

# **AVALIAÇÃO DE RISCO APLICADA AO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS**

**RICARDO MANUEL DE OLIVEIRA TEIXEIRA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JUNHO DE 2009

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

## **AGRADECIMENTOS**

Esta dissertação representa o fim de um ciclo na minha vida, para o qual contribuíram algumas pessoas às quais expresso o meu sincero sentimento de gratidão.

Ao Professor Doutor Nuno Ramos, orientador da dissertação, agradeço a partilha do conhecimento, o desafio constante em busca de informação, a forma organizada como projectou temporalmente a elaboração do trabalho e a disponibilidade demonstrada durante todo este processo.

Aos meus Pais, agradeço a sólida formação e educação incutida ao longo da minha vida e a oportunidade de concretizar todos os meus objectivos. Retribuo o orgulho que têm em mim com a alegria de ver terminada mais esta etapa.

Aos meus amigos, colegas de curso, nomeadamente ao Nuno Bruçó, pela boa disposição transmitida durante o desenrolar de todo este trabalho.

Finalmente, à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, particularmente ao Departamento de Construções Cívicas, pela excelência de formação e pela oportunidade de conhecer prestigiados professores.



## **RESUMO**

O presente trabalho aborda a natureza dos problemas relacionados com o comportamento higrotérmico de edifícios através de um levantamento de literatura que norteia o tema. Através deste conhecimento, foram desenvolvidos e implementados modelos estocásticos de análise de risco a patologias relacionadas com o comportamento higrotérmico de edifícios.

A importância da modelação higrotérmica para soluções construtivas realça a crescente preocupação com o desempenho higrotérmico de edifícios. Este desempenho depende de vários conjuntos de parâmetros, os quais se destacam: ambientais, dos componentes e da própria utilização a que o edifício está submetido.

A partir da teoria subjacente à avaliação de risco, foi possível a aplicação de determinados conceitos e metodologias de análise de risco a problemas relacionados com o comportamento higrotérmico de edifícios.

Relativamente às metodologias de análise de risco, foram desenvolvidos dois modelos de análise de risco: modelo solicitação-resistência e modelo dose-resposta. O estudo destes modelos permitiu a sua aplicação em problemas relacionados com o comportamento higrotérmico de edifícios.

Feita uma revisão bibliográfica aos principais conceitos da análise de risco, foram desenvolvidos processos físicos relativos ao comportamento higrotérmico de edifícios, tendo como objectivo primordial perceber quais os principais parâmetros intervenientes em cada processo físico.

Através do conhecimento dos diferentes parâmetros e aplicando os modelos de análise de risco desenvolvidos, foi possível esquematizar possíveis abordagens de análise de risco, conseguindo assim criar esquemas de análise que possibilitarão, em fase de projecto, perceber o nível de risco que determinadas soluções construtivas apresentam.

As conclusões do presente trabalho fundamentam-se na importância da análise de risco na área da higrotérmica, identificando importantes aspectos tais como: as vantagens e dificuldades da aplicação de modelos de análise de risco em problemas relacionados com a higrotérmica de edifícios, a natureza estocástica dos parâmetros envolvidos nos modelos e a necessidade de aprofundar o conhecimento existente relativo aos diferentes parâmetros com o intuito de desenvolver e simplificar modelos de análise de risco determinísticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** análise de risco, fiabilidade, modelos estocásticos, modelação higrotérmica, variabilidade



## **ABSTRACT**

This paper addresses the nature of the problems related to hygrothermal building performance through a survey of literature that guides the subject. With this knowledge, were developed and implemented stochastic models of risk analysis for different hazards in order to predict the hygrothermal performance of building envelope.

The importance of hygrothermal models in constructive solutions shows the concern about the hygrothermal building performance. This performance depends on several sets of parameters, which are: environmental, components and serviceability.

From the theory behind the risk assessment, it was possible to apply the concepts and methodologies of risk analysis to problems related to the hygrothermal building performance.

Two different models of risk analysis were developed: load-resistance model and dose-response model. The study of these models allowed its application in problems related to the hygrothermal building performance.

Done a literature review on the main concepts of risk analysis, physical processes have been developed in order to understand the main parameters involved in each physical process.

Through knowledge of the different parameters and applying the models of risk analysis developed, it was possible to sketch possible approaches to risk analysis, thereby creating schemes that enable, in the design phase, understand the level of risk that some constructive solutions have.

The conclusions of this study are based on the importance of risk analysis in the hygrothermal performance, identifying important issues such as: the advantages and difficulties of applying stochastic models on issues related to hygrothermal building performance, the stochastic nature of parameters involved in models and the need to improve the existing knowledge on the different parameters in order to simplify and develop deterministic models.

**KEYWORDS:** risk analysis, reliability, stochastic models, hygrothermal modeling, variability





## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>ÍNDICE GERAL</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....	xiii
<b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b> .....	xv

<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objectivos .....	1
1.3. Estrutura .....	2
<b>2. Avaliação de Risco em Engenharia Civil</b> .....	3
2.1. Análise de Risco em Engenharia .....	3
2.2. Avaliação da Fiabilidade .....	3
2.2.1. Factores de Segurança .....	4
2.2.2. Tipos de Incerteza .....	4
2.2.2.1. Fontes Não-Cognitivas .....	5
2.2.2.2. Fontes Cognitivas .....	5
2.3. Principais Passos para a Análise de Risco .....	6
2.4. Terminologia .....	7
2.5. Análise de Risco Aplicada à Área Estrutural VS Análise de Risco Aplicada à Área Higrotérmica .....	10
<b>3. Modelos de Análise de Risco/Fiabilidade</b> .....	13
3.1. Contextualização .....	13
3.2. Modelo Solicitação-Resistência .....	14
3.3. Modelo Dose-Resposta .....	16
3.4. Parâmetros dos Modelos .....	18
3.4.1. Parâmetros Ambientais .....	18

3.2.2. Parâmetros dos Componentes.....	19
3.2.3. Parâmetros de Operação .....	19
3.5. Síntese dos Modelos/Limitações.....	20

## **4. Aplicações do Modelo Solicitação-Resistência ..... 21**

4.1. Enquadramento .....	21
4.2. Condensações Superficiais Interiores .....	22
4.2.1. Processo Físico .....	22
4.2.2. Modelação do Problema .....	24
4.3. Condensações Internas – Regime Permanente .....	26
4.3.1. Processo Físico – Regime Permanente .....	26
4.3.2. Modelação do Problema .....	26
4.4. Condensações Internas – Regime Variável .....	31
4.4.1. Enquadramento .....	31
4.4.2. Processo Físico .....	32
4.4.2.1. Armazenamento de Humidade e Mecanismos de Transporte .....	32
4.4.2.2. Propriedades Higrotérmicas dos Materiais .....	33
4.4.2.3. Clima.....	34
4.4.3. Modelação do Problema .....	34
4.5. Condensações Superficiais Exteriores.....	36
4.5.1. Processo Físico .....	36
4.5.2. Modelação do Problema .....	37

## **5. Aplicações do Modelo Dose-Resposta ..... 41**

5.1. Enquadramento .....	41
5.2. Desenvolvimento de Fungos em Superfícies Interiores.....	41
5.2.1. Condições de Crescimento de Fungos.....	41
5.2.2. Modelos de Previsão para o Crescimento de Fungos .....	45
5.3. Modelação do Problema .....	47

## **6. Comportamento Estocástico dos Parâmetros ..... 53**

6.1. Enquadramento .....	53
6.2. Parâmetros Ambientais.....	55
6.2.1. Relações entre Parâmetros.....	55

6.2.2. Gama de Valores Possíveis .....	57
6.2.3. Análise de sensibilidade aplicada a um acontecimento indesejável: Condensações Superficiais Exteriores.....	61
6.3. Parâmetros dos Componentes.....	64
6.3.1. Gama de Valores Possíveis - Normalização .....	65
6.4. Parâmetros de Operação.....	68
6.4.1. Gama de Valores Possíveis .....	69
<b>7. Conclusões .....</b>	<b>73</b>
7.1. Considerações Finais .....	73
7.2. Conclusões Principais.....	73
7.3. Desenvolvimentos Futuros.....	75
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>77</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Exemplo de uma árvore de decisão.....	6
Fig. 2.2 – Exemplo de uma árvore de acontecimentos.....	6
Fig. 2.3 – Fluxograma do procedimento iterativo para a avaliação de risco .....	10
Fig. 2.4 – Fundamentos da avaliação de risco .....	11
Fig. 3.1 – Interdependência de processos .....	14
Fig. 3.2 – Aproximação probabilística da solicitação S no modelo solicitação-resistência .....	14
Fig. 3.3 – Esquema de princípio do modelo solicitação-resistência .....	16
Fig. 3.4 – Curva Dose-Resposta .....	17
Fig. 3.5 – Curvas Dose-Resposta .....	17
Fig. 4.1 – Exemplo de um diagrama psicrométrico.....	23
Fig. 4.2 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações superficiais interiores.....	25
Fig. 4.3 – Transferência de humidade numa parede porosa .....	26
Fig. 4.4 – Verificação gráfica da existência de condensações internas .....	29
Fig. 4.5 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações internas em regime permanente .....	30
Fig. 4.6 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações internas em regime permanente – Aplicação da Norma 13788.....	31
Fig. 4.7 – Curvas de adsorção para três materiais de construção .....	32
Fig. 4.8 – Mecanismos de transporte de humidade .....	32
Fig. 4.9 – Exemplos de coeficientes de transporte líquido .....	33
Fig. 4.10 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações internas em regime variável .....	35
Fig. 4.11 – Parede em estudo .....	38
Fig. 4.12 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações superficiais exteriores.....	39
Fig. 5.1 – Diagrama esquemático da curva de crescimento de fungos .....	42
Fig. 5.2 – Vista esquemática dos principais parâmetros que afectam o crescimento de fungos - humidade, temperatura, substrato e tempo .....	44
Fig. 5.3 – Isopletras generalizadas de germinação de esporos e crescimento do micélio, para diferentes espécies de fungos, de acordo com a temperatura (em abcissa) e a humidade relativa (em ordenada) .....	46
Fig. 5.4 – Evolução do mold index ao longo do tempo para diferentes condições higrotérmicas.....	49

Fig. 5.5 – Aplicação do modelo dose-resposta na modelação relativa ao crescimento de fungos a partir do modelo VTT .....	50
Fig. 5.6 – Possível abordagem para a modelação do risco de crescimento de fungos.....	51
Fig. 6.1 – Página principal do Programa Condensa 13788: introdução dos diferentes parâmetros ....	54
Fig. 6.2 – Variação anual da temperatura exterior, de Janeiro a Dezembro, de acordo com os dados produzidos pelo METEONORM .....	58
Fig. 6.3 – Temperatura média do ar verificada entre os anos 1931 e 2006 .....	58
Fig. 6.4 – Precipitação verificada entre os anos 1931 e 2006 .....	59
Fig. 6.5 – Variabilidade e alterações climáticas .....	60
Fig. 6.6 – Variação do valor acumulado de CP com a temperatura exterior (simulação numérica).....	61
Fig. 6.7 – Variação do valor acumulado de CP com a humidade relativa exterior (simulação numérica) .....	62
Fig. 6.8 – Variação do valor acumulado de CP com a radiação solar (simulação numérica).....	62
Fig. 6.9 – Variação do valor acumulado de CP com a radiação atmosférica (simulação numérica)....	63
Fig. 6.10 – Variação do valor acumulado de CP com a velocidade do vento (simulação numérica) ...	63
Fig. 6.11 – Variação do valor acumulado de CP com a direcção do vento (simulação numérica).....	64
Fig. 6.12 – Variação da condutibilidade térmica com o teor de humidade para vários materiais de isolamento térmico .....	66
Fig. 6.13 – Gráfico retirado de França (2002) com medições de higrometria em edifícios portugueses (a preto) comparadas com as classes sugeridas pela EN ISO 13788 (a vermelho) e por Freitas e Pinto (a azul).....	71

## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 5.1 – Índice do crescimento de bolor para as experiências e modelação .....	48
Quadro 6.1 – Relação do vento com a nebulosidade .....	56
Quadro 6.2 – Valores do coeficiente de permeabilidade ao vapor ( $\pi$ ) .....	65
Quadro 6.3 – Alguns valores da produção de vapor em edifícios .....	69
Quadro 6.4 – Estimativa da produção de vapor em actividades domésticas .....	69
Quadro 6.5 – Classificação dos edifícios em função da sua higrometria .....	71





## **SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

FS – Factor de Segurança

S – Solicitação

R – Resistência

HR – Humidade Relativa

HA – Humidade Absoluta

$W_s$  – Limite de saturação

$P_p$  – Pressão parcial

$P_s$  – Pressão de saturação

$\omega$  – Produção de vapor

n – Número de renovações horárias

V – Volume interior

$\omega/n.V$  – Higrometria

$\theta_i$  – Temperatura da ambiência interior

$\theta_e$  – Temperatura da ambiência exterior

$\theta_{si}$  – Temperatura superficial interior

$\theta_{se}$  – Temperatura superficial exterior

$\theta_{po}$  – Temperatura de ponto de orvalho

$R_{si}$  – Resistência térmica superficial interior

U – Coeficiente de transmissão térmica

$R_t$  – Resistência térmica total

E – Espessura

g – Densidade do fluxo de difusão de vapor de água

$\pi$  – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

$R_d$  – Resistência à difusão de vapor de água

$\mu$  – Factor de resistência à difusão de vapor de água

$S_d$  – Espessura da camada de ar de difusão equivalente

q – Fluxo de calor por unidade de superfície

t – Tempo

$P_i$  – Pressão parcial de vapor de água no interior

$P_e$  – Pressão parcial de vapor de água no exterior

$\lambda$  – Condutibilidade térmica

$\rho$  – Massa volúmica

$c_p$  – Calor específico

$\phi$  – Porosidade

WUFI – Wärme Und Feuchtetransport Intation

$E_b$  – Emissividade da superfície

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann

CP – Condensação Potencial

$a_w$  – Actividade da água

TOW – Time of Wetness

VTT – Technical Research Centre

TUT – Tampere University of Technology

TOW – Time of Wetness

TOW – Time of Wetness

TOW – Time of Wetness

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Nos últimos anos tem havido uma preocupação crescente com a qualidade na construção, mas nem sempre esse esforço tem levado à melhoria da qualidade dos edifícios, apresentando muitos deles, um conjunto significativo de patologias. A humidade é uma das principais causas dessas patologias.

A manifestação de humidades nos edifícios dá, em regra, lugar a graves perturbações funcionais, causando redução apreciável da durabilidade dos materiais e provocando condições deficientes de habitabilidade para os utilizadores [1].

É essencial o conhecimento dos processos físicos envolvidos no fenómeno da humidade de forma a avaliar a resposta de um edifício face às solicitações climáticas e seleccionar as soluções técnicas que garantam um desempenho higrotérmico adequado à localização do edifício [2].

A partir deste conhecimento, é possível iniciar a modelação relativa ao comportamento higrotérmico, sendo os resultados provenientes dessa modelação essenciais para o correcto entendimento dos fenómenos em causa. No entanto, a modelação baseada em aproximações determinísticas pode não ser suficiente para o estudo do comportamento higrotérmico de edifícios. Segundo estas aproximações as propriedades dos materiais, as condições iniciais e as condições climáticas são determinísticas e não são afectadas por qualquer processo de aleatoriedade. Na realidade, estes pressupostos não são bem conhecidos pois assumem uma variabilidade extensa. Para ter em conta estes efeitos, é necessário recorrer a modelos higrotérmicos estocásticos no sentido de prever o desempenho higrotérmico da envolvente dos edifícios para uma vasta gama de condições potenciais.

A utilização de modelos estocásticos na área da análise higrotérmica é um assunto novo, que necessita de ser aprofundado, pois através dele se perceberá o real desempenho da envolvente dos edifícios.

A partir do desenvolvimento de modelos higrotérmicos e do conhecimento dos principais parâmetros que intervêm numa determinada patologia, conseguir-se-á utilizar a análise de risco com o objectivo de testar a fiabilidade de uma determinada solução face ao risco da ocorrência de uma patologia.

### 1.2. OBJECTIVOS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objectivo central a aplicação da avaliação de risco ao desempenho higrotérmico de edifícios.

Para atingir o objectivo central, definiu-se um conjunto de objectivos parciais que em conjunto o materializam:

- Elaboração do estado da arte sobre a análise de risco em engenharia civil, identificando os principais passos na sua elaboração e expondo a terminologia e definições básicas para o seu correcto entendimento;
- Esquematização de modelos de avaliação de risco aplicados ao comportamento higrotérmico de edifícios;
- Organização de problemas na área da higrotérmica associados à humidade na construção;
- Comparação dos diferentes modelos de análise de risco aplicados ao comportamento higrotérmico de edifícios, evidenciando as suas vantagens e dificuldades de aplicação;
- Explanação de modelos físico-matemáticos que traduzem o desenvolvimento de patologias;
- Análise do comportamento estocástico dos parâmetros intervenientes em problemas relacionados com o comportamento higrotérmico de edifícios;

### **1.3. ESTRUTURA**

A presente Tese divide-se em 7 capítulos:

- O capítulo 1 introduz os restantes capítulos e resume os objectivos deste trabalho;
- O capítulo 2 corresponde a uma síntese do estado da arte do conhecimento no domínio da análise de risco em engenharia civil;
- O capítulo 3 desenvolve dois modelos de avaliação de risco, explicando as suas possíveis utilizações bem como a natureza dos parâmetros que nele intervêm;
- O capítulo 4 refere-se à aplicação de um dos modelos desenvolvidos no capítulo 3. O modelo solicitação-resistência será aplicado para a análise de risco relativamente aos principais tipos de condensações presentes num edifício;
- O capítulo 5 aborda o segundo modelo desenvolvido no capítulo 3. O modelo dose-resposta será aplicado na análise de risco de desenvolvimento de fungos em superfícies interiores;
- O capítulo 6 descreve o comportamento estocástico dos parâmetros envolvidos nas análises de risco efectuadas nos dois capítulos anteriores. Aborda a natureza estocástica dos parâmetros e indica algumas normas para a sua determinação;
- O capítulo 7 resume as principais conclusões e perspectiva o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2

## AVALIAÇÃO DE RISCO EM ENGENHARIA CIVIL

**2.1. ANÁLISE DE RISCO EM ENGENHARIA**

A aplicação do risco e fiabilidade em análise, concepção e planeamento de sistemas, tem recebido por todo o mundo uma aceitação por parte da actividade de engenharia. Como resultado de grandes esforços das diferentes disciplinas de engenharia durante as últimas três décadas, as orientações e os códigos de concepção têm vindo a modificar-se ou já se modificaram, de forma a incorporar o conceito de análise de risco na concepção de projectos [3].

Para os engenheiros que estão familiarizados com este conceito, a sua aplicação continua a ser complexa. Isto deve-se ao facto das teorias básicas e algoritmos continuarem em investigação e desenvolvimento. Nas últimas décadas, muita experiência tem sido ganha através da investigação e, agora, é altura de cristalizar estes conceitos para que fiquem com um formato fácil de usar, e assim permitir a sua utilização regular [3].

Na Engenharia Civil, bem como em outras áreas, tem-se como objectivo projectar de forma económica, dentro de níveis de segurança especificados. Muitas vezes, é necessário analisar a previsão do desempenho de um sistema para o qual existe pouca ou nenhuma experiência. Na elaboração de um projecto de engenharia são feitas idealizações do sistema a ser representado. Tradicionalmente, as solicitações às quais o sistema está submetido são modeladas por representações geométricas ou analíticas simples, assim como os materiais e suas propriedades são considerados estáveis e definidos de maneira única [4]. A análise de risco permite associar a economia à segurança.

**2.2. AVALIAÇÃO DA FIABILIDADE**

Diferentes termos são usados para descrever a fiabilidade de um sistema. Alguns destes termos são auto-explicativos, enquanto outros não o são. O termo comumente usado *probabilidade de rotura* está sempre associado a um *critério de desempenho* particular. Um sistema usualmente terá vários critérios particulares de desempenho e a probabilidade de rotura está relacionada com cada um destes critérios. A probabilidade de rotura pode ser expressa como uma fracção, tal como 1/100, ou como um decimal, 0,01. A *fiabilidade* é a probabilidade de sucesso do desempenho; deste modo, é o oposto ao termo probabilidade de rotura [3].

### 2.2.1. FACTORES DE SEGURANÇA

Uma medida de fiabilidade, no contexto das especificações de concepção, é o factor de segurança, cujo valor fornece uma medida de segurança qualitativa. O factor de segurança pode ser usado no contexto de solicitação do sistema, ou resistência (ou capacidade) do sistema, ou ambos. No contexto da solicitação, o valor normalmente observado é multiplicado por um factor de segurança superior a 1 para obter a solicitação de projecto. No contexto da resistência, o valor nominal da resistência do sistema é multiplicado por um factor normalmente inferior a 1 de maneira a obter a resistência permitida. Tanto a solicitação como a resistência são quantidades incertas, com uma média e um desvio padrão. A palavra nominal significa que um valor determinístico é especificado pelo projectista ou fabricante para a solicitação e/ou resistência para efeitos de concepção. Normalmente, no caso das solicitações, o valor nominal é superior ao valor da média. No caso da resistência, o valor nominal é inferior ao valor da média [3].

Quando ambos os factores são usados (solicitação e resistência), a segurança global ( $FS_{Global}$ ) é medida através do rácio de valores da solicitação ( $S$ ) e da resistência ( $R$ ). O factor de segurança central ( $FS_{Central}$ ) é o rácio dos valores médios da resistência e da solicitação. O factor de segurança nominal ( $FS_{Nom.}$ ) é o rácio dos valores nominais da resistência e da solicitação.

$$FS_{Global} = \frac{R}{S} \qquad FS_{Central} = \frac{R_{médio}}{S_{médio}} \qquad FS_{Nom.} = \frac{R_{Nom.}}{N_{Nom.}}$$

Os profissionais em engenharia sempre reconheceram a presença de incerteza na análise e concepção de um sistema. No entanto, as aproximações tradicionais simplificam o problema considerando parâmetros incertos como sendo determinísticos e contabilizando as incertezas através do uso de factores de segurança empíricos. Os factores de segurança derivam da experiência do passado mas não garantem absolutamente a segurança e a satisfação do desempenho. Do mesmo modo, estes não fornecem informação de como diferentes parâmetros do sistema influenciam a segurança. Portanto, é complicado conceber um sistema com distribuição uniforme de níveis de segurança misturando diferentes componentes usando factores de segurança empíricos [3].

Por este motivo, várias orientações ou códigos de concepção têm sido revistos recentemente com o intuito de incorporar a análise de probabilidades. A utilização da análise de probabilidades permite fornecer informação sobre o comportamento de sistemas, a influência de variáveis incertas no seu desempenho e a interação entre diferentes componentes. Enquanto a análise de probabilidades traz racionalidade na consideração de incerteza no projecto, esta não desconta a experiência e especialização acumuladas num sistema em particular. De facto, a metodologia probabilística inclui o “factor profissional”, no qual incorpora a opinião especializada de projectistas experientes, sobre quantidades incertas no sistema [3].

### 2.2.2. TIPOS DE INCERTEZA

A análise da fiabilidade necessita de informação acerca das incertezas de um sistema. Antes de reunir a informação referente a essas incertezas e continuar o processo da análise da fiabilidade, o engenheiro precisa de perceber que existem diferentes tipos de incerteza no sistema, e que cada tipo de incerteza exige diferentes abordagens. Em sentido lato, as incertezas num sistema podem resultar de fontes cognitivas e não-cognitivas [3].

#### 2.2.2.1. FONTES NÃO-COGNITIVAS

As fontes de incerteza ou aleatoriedade não-cognitivas ou quantitativas incluem os parâmetros do sistema que são tratados como variáveis aleatórias com distribuição probabilística baseados em dados estatísticos. Nestes casos, a resposta do sistema pode ser avaliada pela teoria da probabilidade.

As fontes não-cognitivas podem ser classificadas em três tipos [3]:

- Aleatoriedade inerente;
- Incerteza estatística;
- Incerteza na modelação.

A primeira fonte é a **aleatoriedade inerente** em toda a observação física. Isto é, medições repetidas da mesma quantidade física não produzem o mesmo valor, devido a numerosas flutuações no ambiente, nos procedimentos de ensaio, nos instrumentos e nos observadores. O engenheiro tenta resolver este tipo de incerteza recolhendo um grande número de observações. Isto fornece uma boa informação acerca da variabilidade da informação medida e leva a alta confiança no valor usado na concepção. No entanto, o número de observações que pode ser recolhido é limitado pela disponibilidade de recursos.

Isto leva-nos à segunda fonte de incerteza, conhecida como **incerteza estatística**. Neste caso, não existe informação precisa acerca da variabilidade da quantidade física em causa, devido à limitação de dados. A informação sobre a variabilidade irá variar dependendo do número de amostras utilizadas. Por conseguinte, medidas quantitativas de confiança baseadas na quantidade de amostras são acrescentadas à avaliação da fiabilidade.

O terceiro tipo de incerteza refere-se à **incerteza na modelação**. Os modelos de análise de sistemas são apenas representações aproximadas do comportamento do sistema. Os modelos computacionais esforçam-se para apreender as características essenciais do comportamento do sistema através de relações matematicamente idealizadas ou procedimentos numéricos, como por exemplo, o método de elementos finitos para a análise estrutural. A metodologia probabilística é capaz de incluir a incerteza na modelação. A experiência passada na diferença entre modelos computacionais e o actual comportamento real pode ser usada para desenvolver uma descrição estatística do erro na modelação, para que seja incluído como uma variável adicional na análise da fiabilidade.

Estas três fontes de incerteza podem ser ilustradas com um exemplo simples. Vamos supor que a solicitação do vento ou a pressão actuante num edifício precisa de ser estimada. São registados os dados relativos à velocidade do vento no local. A velocidade do vento não pode ser prognosticada com certeza, como se percebe facilmente; deste modo, é inerentemente aleatória. A sua incerteza estatística pode ser estimada considerando observações passadas, para além de mais dados para uma melhor estimativa. No entanto, a informação estatística relativa à velocidade do vento precisa de ser convertida para a pressão do vento, onde o teorema de Bernoulli é aplicado. Isto introduz outra fonte de incerteza, conhecida como a incerteza na modelação.

#### 2.2.2.2. FONTES COGNITIVAS

As fontes de incerteza cognitivas ou qualitativas relacionam a imprecisão dos problemas decorrentes de abstracções intelectuais da realidade. Estas fontes incluem incertezas decorrentes de informações imprecisas ou vagas, sujeitas a julgamentos ou a subjectividade de informações. Os axiomas da probabilidade e estatística são limitados para tratar este tipo de incerteza. Sendo assim, é necessário utilizar outras ferramentas de análise, como por exemplo, a teoria dos conjuntos fuzzy.

## 2.3. PRINCIPAIS PASSOS PARA A ANÁLISE DE RISCO

Na análise de risco é necessário distinguir dois importantes passos [5]:

1. Identificação de acontecimentos com possíveis consequências indesejáveis e definição dos cenários para a ocorrência desses acontecimentos;
2. Estimativa das probabilidades e consequências desses acontecimentos.

O primeiro passo é uma tarefa crucial para a análise de risco. Exige uma verificação detalhada e compreensão de todo o sistema. Por esta razão, uma grande variedade de técnicas têm sido desenvolvidas para ajudar o engenheiro a ter um bom desempenho na execução desta tarefa (ex: árvore de acontecimentos, árvore de decisão, etc) [5].

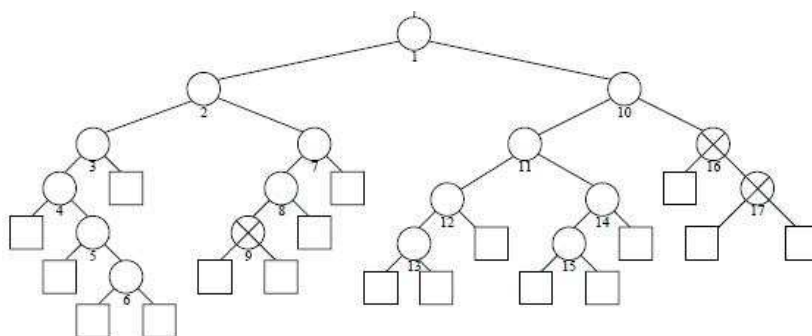


Fig. 2.1 – Exemplo de uma árvore de decisão [6]

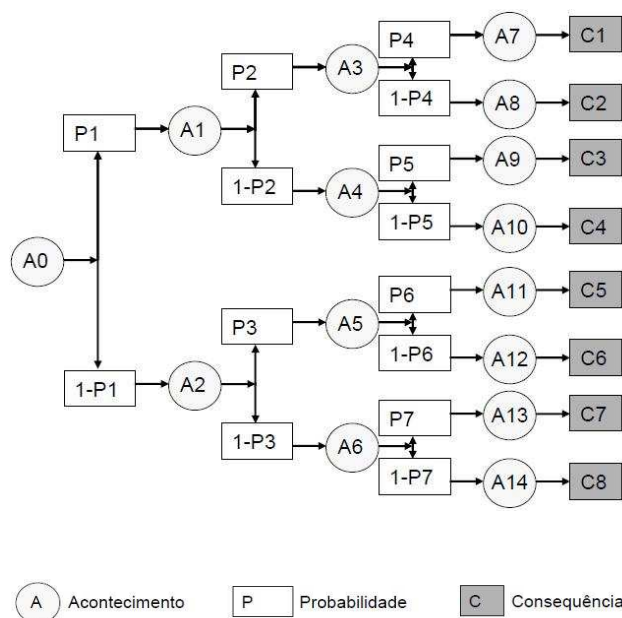


Fig. 2.2 – Exemplo de uma árvore de acontecimentos [7]



De uma maneira geral, o risco é expresso em termos da probabilidade e consequências de acontecimentos indesejáveis (segundo passo na análise de risco). Se as fontes de incerteza são não-cognitivas, ou seja, numa análise de risco quantitativa, para todos os possíveis cenários de acontecimentos indesejáveis, as possíveis consequências e as correspondentes probabilidades são estimadas [5].

As características da aleatoriedade podem ser descritas graficamente sob a forma de histogramas ou diagramas de frequências. Para uma representação da aleatoriedade mais geral, o diagrama de frequências pode ser aproximado a uma função densidade conhecida, tal como a função densidade normal. No entanto, para descrever unicamente a função densidade probabilidade, certos parâmetros da distribuição precisam de ser estimados. A estimativa destes parâmetros é por si própria a maior componente da análise da incerteza. A aleatoriedade de cada parâmetro de solicitação e resistência pode ser quantificado usando estas estatísticas [3].

## 2.4. TERMINOLOGIA

Interessa neste ponto esclarecer alguns termos relacionados com a análise e avaliação de risco. Depois da exposição de algumas definições importantes, será apresentado um esquema resumo relativo aos procedimentos dentro da avaliação de risco.

Assim, recorrendo a bibliografia especializada [8], podem definir-se os seguintes termos:

- *Acontecimento indesejável* – um acontecimento ou uma combinação de acontecimentos com um potencial de consequências indesejáveis;  
Nota: Existe uma dificuldade em traduzir o termo “hazard” para a língua Portuguesa. Optou-se pela expressão “acontecimento indesejável” pois é aquela que melhor se enquadra à abordagem que a presente dissertação segue.
- *Cenários de acontecimentos indesejáveis* – uma sequência de possíveis acontecimentos, causados por um determinado acontecimento indesejável, que podem levar a consequências indesejáveis;
- *Acontecimento* – Ocorrência de um determinado conjunto de circunstâncias.  
Nota: Um acontecimento indesejável é um acontecimento que pode causar consequências adversas);
- *Probabilidade* – Verosimilhança ou grau de confiança de um acontecimento particular ocorrido dentro de uma determinada referência;  
Nota: A probabilidade pode depender, significativamente, do período de tempo durante o qual um acontecimento particular pode ocorrer.
- *Probabilidade objectiva* – Probabilidade determinada usando argumentos teóricos ou dados estatísticos adequados;
- *Probabilidade subjectiva* – Probabilidade determinada usando a intuição e a experiência relevante;

- *Consequência* – A utilidade atribuída a um acontecimento de acordo com as preferências do decisor;  
Nota 1: Pode existir mais do que uma consequência a partir de um acontecimento;  
Nota 2: As consequências podem variar de benéficas a adversas;  
Nota 3: As consequências podem ser expressas qualitativamente ou quantitativamente.
  
- *Risco* – As consequências adversas esperadas associadas a um acontecimento, uma actividade ou uma decisão alternativa. Em geral, o risco é a combinação da probabilidade de um acontecimento e a sua consequência.  
Nota 1: O risco é frequentemente estimado através da esperança matemática das consequências de um acontecimento indesejável. Então, é o produto “probabilidade x consequências”. No entanto, uma interpretação mais geral do risco pode envolver a probabilidade e as consequências de uma forma diferente. Esta apresentação é útil particularmente quando há um espectro de consequências, em que cada uma tem a sua probabilidade de ocorrência.  
Nota 2: Vários níveis de risco podem ser reconhecidos, por exemplo: risco objectivo, risco aceitável ou risco tolerável.
  
- *Risco objectivo* – Uma estimativa do risco do sistema, obtido usando argumentos teóricos, dados estatísticos adequados ou métodos de análise de risco quantificados;
  
- *Fiabilidade* – Capacidade de uma estrutura ou de um elemento estrutural para cumprir as exigências específicas durante um dado período de tempo;  
Nota 1: A fiabilidade é frequentemente expressa como a probabilidade relativa a uma exigência específica e a um período de tempo.  
Nota 2: Relativamente aos estados limite último, a fiabilidade é referida como a segurança. Para os estados limite de serviço, a fiabilidade é referida como aptidão para a utilização.
  
- *Critério de risco* – Pontos de referência contra os quais os resultados da análise de risco são avaliados. Os critérios são geralmente baseados em regulamentos, normas, experiência e/ou conhecimentos teóricos usados como a base da decisão sobre o risco aceitável;
  
- *Risco aceitável* – Nível de risco que pode ser considerado como um ponto de referência para o critério de risco;
  
- *Identificação de acontecimentos indesejáveis* – Processo de reconhecimento dos acontecimentos indesejáveis e definição das suas características;
  
- *Análise de risco* – Utilização de informação disponível, no que diz respeito a situações relevantes de acontecimentos indesejáveis, para a estimativa de risco;

- *Avaliação de risco* – Processo de análise de risco, aceitação do risco e análise de opções;
- *Estimativa do risco* – Processo usado para produzir a estimativa de uma medida do risco;
- *Comparação do risco* – Processo de aceitação do risco e análise de opções;
- *Análise de sensibilidade* – Procedimento sistemático para descrever e/ou calcular o efeito das variações dos dados input e os pressupostos subjacentes no resultado final;
- *Análise de opções* – Processo usado para identificar a variação das alternativas possíveis para a gestão do risco;
- *Tratamento do risco* – Processo de selecção e implementação de medidas para modificar o risco;
- *Aceitação do risco* – Decisão para aceitar o risco.

Com o objectivo de sistematizar este assunto, é apresentado de seguida o procedimento iterativo para a avaliação de risco.

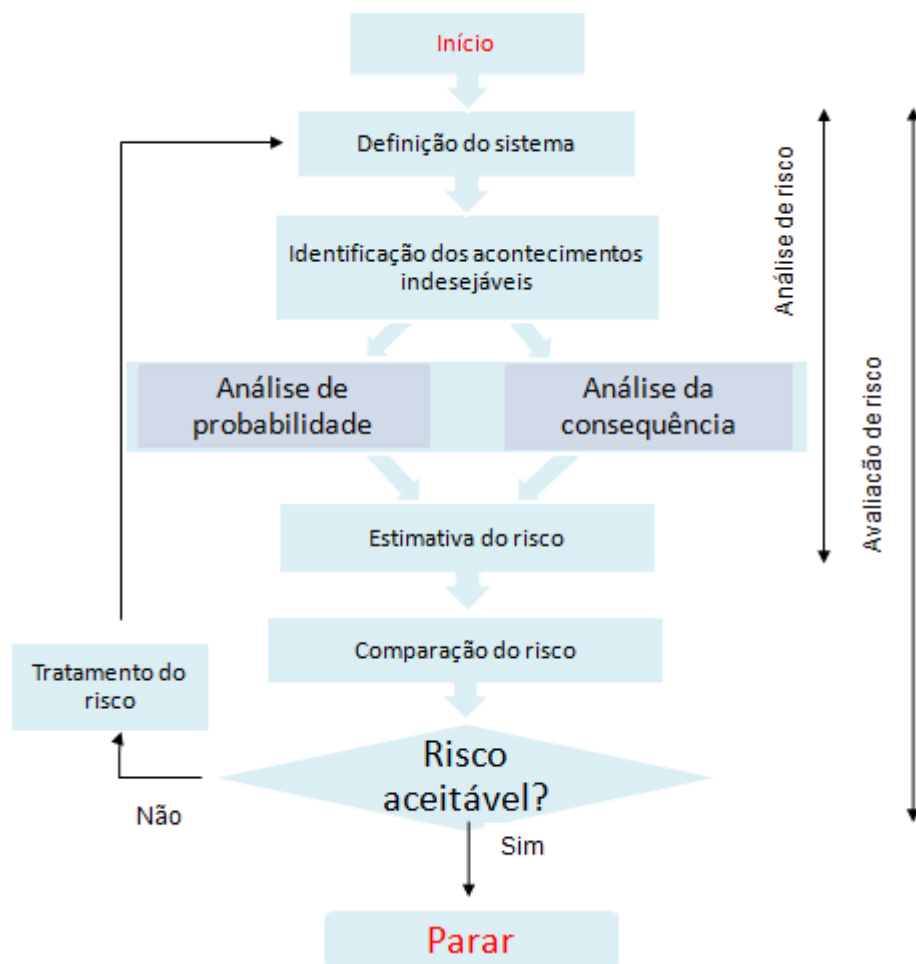


Fig. 2.3 – Fluxograma do procedimento iterativo para a avaliação de risco [8]

## 2.5. ANÁLISE DE RISCO APLICADA À ÁREA ESTRUTURAL VS ANÁLISE DE RISCO APLICADA À ÁREA HIGROTÉRMICA

Em geral, num projecto de engenharia é necessário satisfazer vários critérios de desempenho, segurança, serviço e durabilidade. Por exemplo, uma estrutura deve ser concebida para que a sua resistência seja maior do que os efeitos provocados pelas solicitações. No entanto, existem inúmeras fontes de incerteza nos parâmetros relacionados com as solicitações e resistências.

Na presença de incerteza, não é simples satisfazer os requisitos de concepção. A Fig. 2.4 mostra um simples caso considerando duas variáveis (uma relacionando uma exigência do sistema, por exemplo, a solicitação numa estrutura,  $S$ , e a outra a capacidade do sistema, por exemplo, a resistência da estrutura,  $R$ ). Ambas,  $R$  e  $S$ , são de natureza aleatória; a sua aleatoriedade é caracterizada através das suas médias  $\mu_S$  e  $\mu_R$ , desvios padrão  $\sigma_S$  e  $\sigma_R$ , e correspondentes funções densidade probabilidade  $f_S(s)$  e  $f_R(r)$ , respectivamente. Nesta figura são, também, identificados os valores (nominais) determinísticos destes parâmetros,  $S_N$  e  $R_N$ , usados numa convencional aproximação do factor de segurança [3].

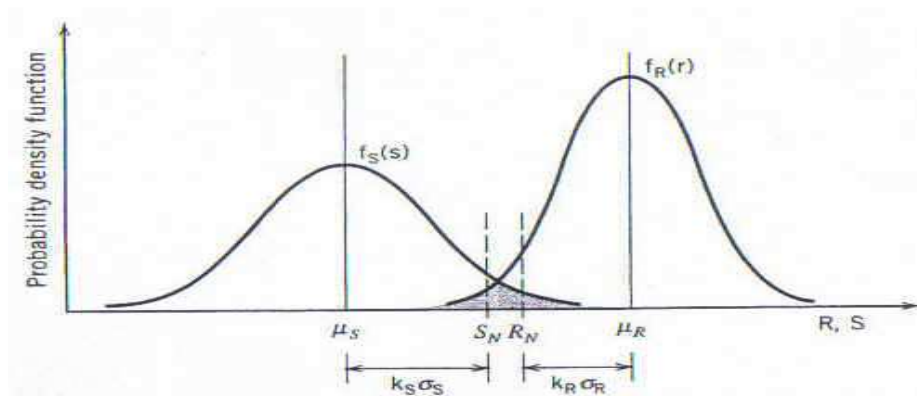


Fig. 2.4 – Fundamentos da avaliação de risco [3]

Da mesma forma que existe análise de risco para a caracterização estrutural de uma estrutura, esta análise pode ser igualmente realizada na higrotérmica de edifícios.

A análise de risco pode ser realizada na área da higrotérmica com vista a estimar a segurança relativa à humidade. O método com factores de segurança, usado no dimensionamento estático, é de difícil aplicação num projecto higrotérmico. Um melhor método tem que considerar uma análise de risco real onde todos os parâmetros de cálculo são descritos através de uma curva de distribuição. Assim, o cálculo pode ser considerado usando um valor aleatório da curva de distribuição de todos os diferentes parâmetros. É possível, através do emprego de um largo número de cálculos, obter uma base estatística a partir da qual podemos ler o risco de, por exemplo, o teor de humidade de um material exceder um certo valor [9].

Na lógica higrotérmica, a curva de solicitação  $S$  dependerá de factores tais como: condições fronteira, clima, etc. Em relação à curva da resistência, esta dependerá das propriedades dos materiais. A definição concreta destas propriedades torna este assunto mais complexo.



# 3

## MODELOS DE ANÁLISE RISCO/FIABILIDADE

### 3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com Freitas, V [10], ao longo das últimas décadas tem vindo a ocorrer na construção, tal como em muitos outros domínios, uma profunda alteração das regras, ideais, conceitos e exigências a satisfazer. Verifica-se, actualmente, a existência de muitos edifícios que não apresentam a qualidade, a durabilidade e o desempenho desejáveis, nomeadamente no que diz respeito à sua envolvente.

A causa principal deste problema reside na complexidade crescente da construção e na ausência de compatibilização de múltiplas exigências.

Tendo em vista este problema, é necessário recorrer a alguma metodologia que, em fase de projecto, possibilite avaliar a fiabilidade das soluções adoptadas. Com este objectivo, a realização deste capítulo pretende enquadrar a aplicação de modelos de análise de risco/fiabilidade ao comportamento higrotérmico de edifícios.

Na Fig. 3.1 mostra-se a inter-dependência de processos dentro da área de um edifício, focando, principalmente, três grandes secções: os componentes do edifício, o exterior do edifício e o interior do edifício. A análise de risco pode ser utilizada para examinar alguns factores, tais como: ventilação, transferência de calor, desempenho face à humidade de diferentes componentes do edifício, etc. Alguns desses factores estão listados na Fig. 3.1.

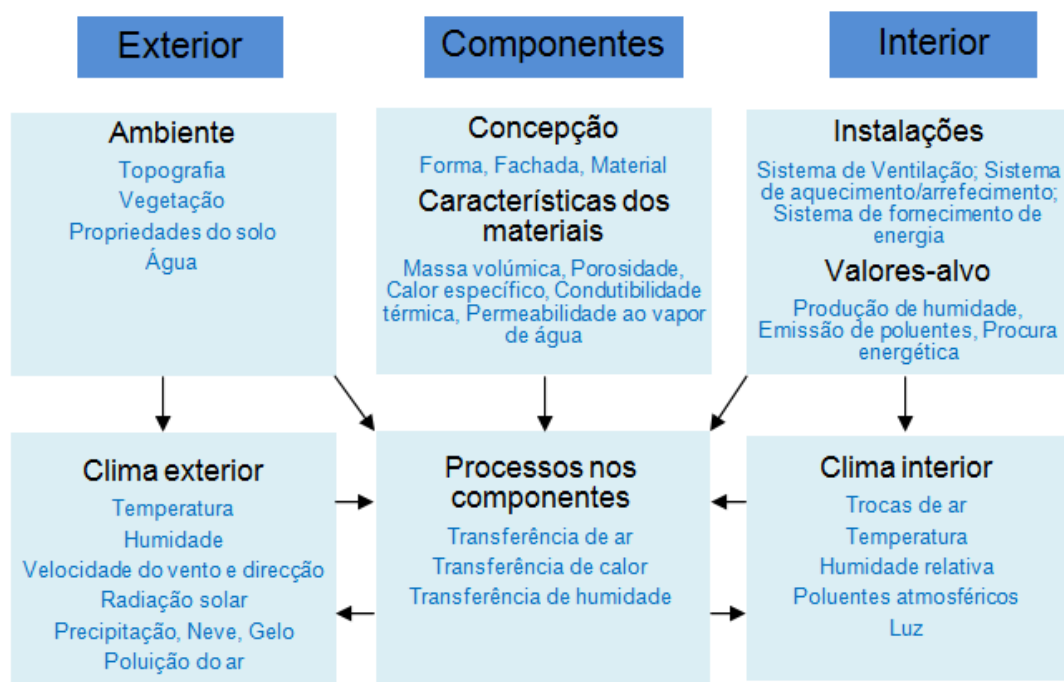


Fig. 3.1 – Interdependência de processos [11]

As condições climáticas, as actividades humanas dentro de um edifício e os critérios para o conforto humano são aleatórios. Até as propriedades dos componentes são incertas, comparativamente. A análise probabilística aparece como a aproximação apropriada para ter em conta estas incertezas quando se avalia o desempenho de um edifício [11].

### 3.2. MODELO SOLICITAÇÃO-RESISTÊNCIA

Neste capítulo interessa desenvolver o aspecto da aproximação probabilística para a avaliação do desempenho do edifício/ambiente. Conhecido no campo da concepção estrutural como solicitação-resistência, este conceito pode ser aplicado à análise do comportamento higrotérmico.

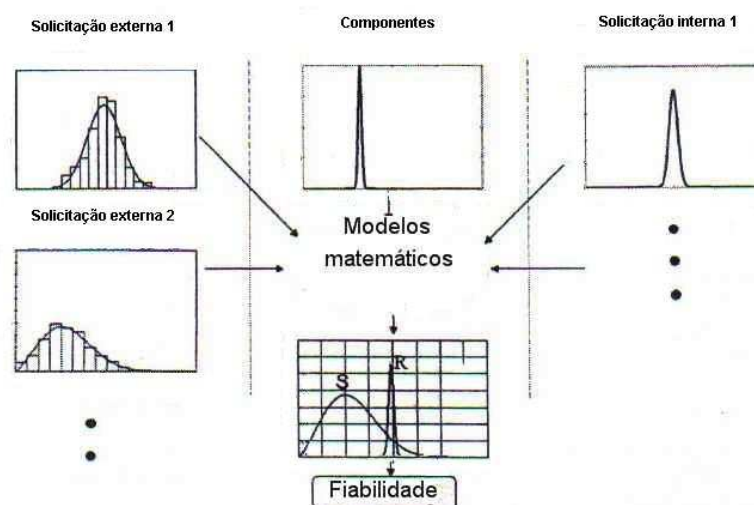


Fig. 3.2 – Aproximação probabilística da solicitação S no modelo solicitação-resistência [11]



Tendo por base o esquema da Fig. 3.2, pode ser atribuído um carácter aleatório à solicitação do sistema (caracterizada pelas várias solicitações que o sistema está submetido) e, da mesma forma, um carácter aleatório à resistência do sistema. O conjunto das várias solicitações, caracterizadas pelas suas curvas de distribuição, formam a curva de solicitação global  $S$ . Por outro lado, a curva de resistência  $R$  forma-se através do conhecimento das curvas de distribuição das propriedades dos materiais.

Assim, com base neste esquema de princípio, poderão definir-se dois conceitos fundamentais para a interpretação do modelo de análise de risco a desenvolver. Estes conceitos serão a base do modelo, pelo que terá interesse a sua explanação de seguida [11]:

- **Função de desempenho** – O modelo a desenvolver oferece uma estimativa da probabilidade da rotura usando relações matemáticas entre as funções densidade probabilidade correspondentes aos parâmetros de solicitação e resistência. Alguns destes parâmetros são tratados no modelo como variáveis aleatórias, enquanto outros são tratados como quantidades determinísticas. A definição da *função de desempenho* traduzirá a relação funcional entre as variáveis aleatórias, correspondentes a um critério de desempenho;
- **Limites de serviço** – Estes limites servirão para limitar um conjunto de condições de serviço inaceitáveis. Estas condições de serviço são provenientes de patologias verificadas em problemas estudados e que têm uma relação directa com os acontecimentos indesejáveis correspondentes.

Para a avaliação da fiabilidade do comportamento de um edifício, de acordo com Pietrzyk & Hagentoft [12], os parâmetros de resistência são valores determinísticos, quantificados em documentos normalizados ou documentos técnicos. No entanto, se os dados probabilísticos das solicitações estão disponíveis, os limites de serviço podem, também, ser tratados como variáveis aleatórias.

Tendo por base os conceitos expostos, a esquematização do modelo de análise de risco (Fig. 3.3) ajudará o seu correcto entendimento:

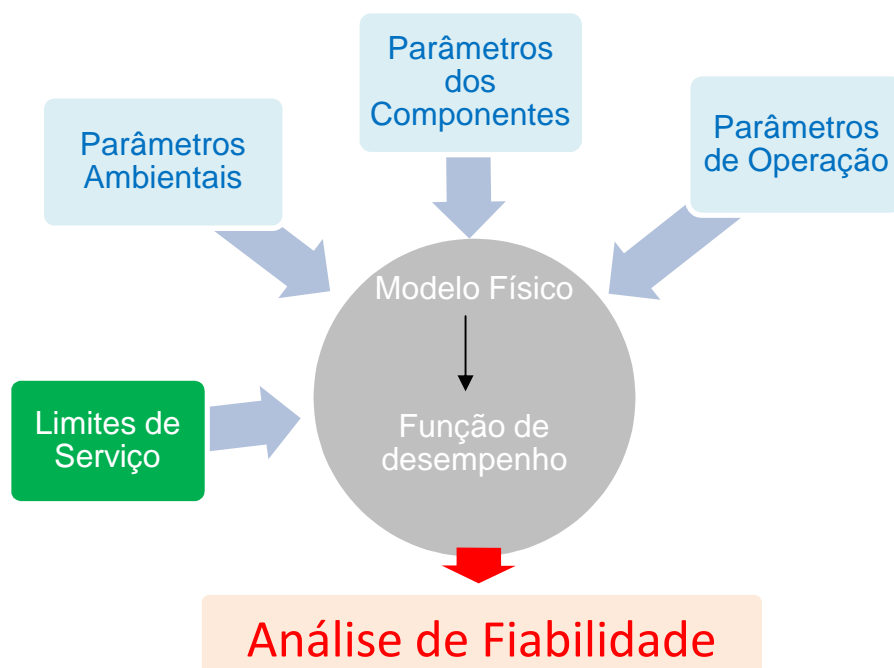


Fig. 3.3 – Esquema de princípio do modelo solicitação-resistência

### 3.3. MODELO DOSE-RESPOSTA

O modelo *dose-resposta* torna a avaliação de risco mais complexa relativamente ao modelo proposto anteriormente. Este modelo é frequentemente usado para estudar problemas relativos à qualidade do ar interior. A partir dos vários parâmetros envolvidos na caracterização da qualidade do ar interior consegue-se uma avaliação de risco da influência de cada parâmetro na saúde dos utilizadores. No entanto, a abordagem deste modelo neste capítulo terá um objectivo diferente. Recorrendo aos princípios da avaliação dose-resposta, abordados de seguida, tentar-se-á perceber a natureza estocástica dos parâmetros envolvidos no acontecimento indesejável que será abordado no capítulo 5.

A avaliação dose-resposta é um processo de caracterização das relações entre uma determinada dose administrada e o efeito dessa dose num componente. “Dose” é usada para indicar a quantidade de um determinado parâmetro, enquanto a resposta servirá para mostrar o efeito desse parâmetro no componente [13].

As relações dose-resposta são determinadas graficamente através da determinação do efeito da variação da dose na resposta. Geralmente, aumentando a dose de um determinado parâmetro, resultará num aumento do efeito (resposta) e, como consequência, num aumento da severidade desse efeito (patologia).

A extensa quantidade de dados disponíveis para caracterizar a dose e a resposta leva, obrigatoriamente, ao apoio gráfico com o intuito de mostrar as relações entre a dose e a resposta. Assim, define-se curva dose-resposta (Fig.3.4), como sendo o gráfico que pode ser usado para mostrar as relações entre a dose e a incidência ou probabilidade da resposta num determinado componente [13].

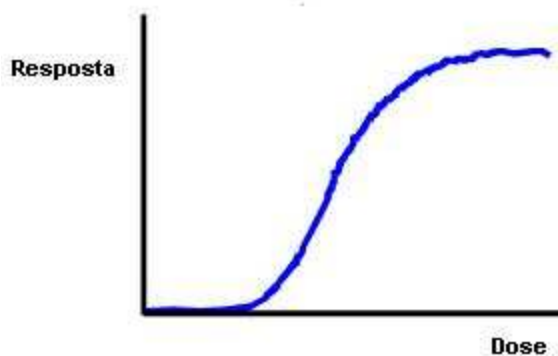


Fig.3.4 – Curva Dose-Resposta [13]

As relações entre a dose e a resposta são baseadas nos seguintes pressupostos [13]:

1. A resposta aumenta quando a dose aumenta;
2. Existe uma dose limiar – dose abaixo da qual não há qualquer efeito.

A questão relativa às relações dose-resposta é fundamental para a aplicação deste modelo. Para ajudar a perceber esta questão é necessário conhecer uma definição directamente relacionada com o modelo dose-resposta.

A **Potência** é um termo que expressa a severidade dos efeitos provocados por uma determinada dose num certo tempo de exposição [13]. A Fig.3.5 traduz implicitamente este conceito.

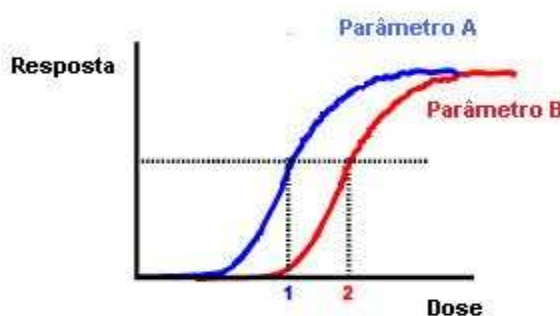


Fig.3.5 – Curvas Dose-Resposta [13]

A partir desta demonstração pode concluir-se que o Parâmetro A (curva azul) é mais potente que o Parâmetro B (curva vermelha). Isto é evidente através da análise da dose requerida para produzir metade da resposta máxima.

O Parâmetro A e B produzem ambos a mesma resposta. No entanto, o Parâmetro A desencadeia a resposta a uma dose mais baixa relativamente ao Parâmetro B.

Embora esta explicação se torne um pouco simplista comparativamente à complexidade do problema, é através dela que uma possível abordagem pode ser seguida. Assim, conhecendo a natureza estocástica dos vários parâmetros que estão envolvidos no comportamento higrotérmico, consegue-se relacionar o comportamento estocástico dos vários parâmetros com a deslocação das curvas dose-resposta.

Ou seja, a curva representará um determinado parâmetro (parâmetro necessário para caracterizar o comportamento de um determinado acontecimento indesejável). A partir de pequenas variações que um dado parâmetro pode sofrer, verificar-se-á se a resposta é antecipada ou não. A resposta é baseada num modelo higrotérmico onde, por exemplo, um dado indicador traduz, ao longo do tempo, o efeito da dose no componente em causa.

O modelo a partir do qual será aplicado este conceito de dose-resposta é apresentado no capítulo 5.

### 3.4. PARÂMETROS DO MODELO

A análise dos parâmetros leva a conclusões acerca da importância da sua variabilidade e/ou da sua incerteza epistémica [11]. Assim, é possível dar uma resposta ao sistema e tomar uma decisão que permita saber se os parâmetros devem ser tratados como determinísticos ou aleatórios nos modelos de análise de risco apresentados nos subcapítulos anteriores.

Neste momento é necessário explicar o tipo de parâmetros que estão envolvidos nos modelos de análise de risco. Estes parâmetros servem de *input* para a modelação. Dividem-se em três grupos:

- Parâmetros Ambientais;
- Parâmetros dos Componentes;
- Parâmetros de Operação.

Estes parâmetros podem ser objecto de uma análise de sensibilidade, tendo por base simulações numéricas. Os resultados obtidos a partir permitem a discussão acerca da relevância de cada parâmetro no fenómeno em estudo. Os parâmetros que tiverem uma natureza estocástica e que têm uma influência decisiva no fenómeno em causa, devem ser considerados como variáveis aleatórias nos modelos de análise de risco.

#### 3.4.1. PARÂMETROS AMBIENTAIS

Na Fig.3.1, estão listados alguns dos factores que intervêm nesta análise. Estes parâmetros têm como objectivo descrever o lugar e os dados climáticos.

Alguns desses parâmetros ambientais são:

- Temperatura do ar exterior;
- Humidade relativa exterior;
- Velocidade do vento;
- Direcção do Vento;
- Precipitação;
- Vegetação.

### 3.4.2. PARÂMETROS DOS COMPONENTES

Em relação a estes parâmetros, interessa conhecer aspectos tais como:

- Geometria do edifício (área das componentes do edifício, dimensões e o volume do edifício);
- Orientação - A escolha criteriosa da orientação de um edifício influencia significativamente a sua exposição aos parâmetros ambientais citados no ponto anterior;
- Características dos materiais - Dentro da caracterização da edificação, é importante mencionar a caracterização dos materiais e componentes do edifício, e suas principais propriedades higro-térmicas, que influenciam o desempenho higrotérmico do edifício e dos seus componentes;
- Propriedades de transferência de calor;
- Propriedades de transferência de humidade;
- Propriedades físicas do ar.

### 3.4.3. PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

Estes parâmetros estão relacionados com a operacionalidade do edifício, ou seja, com a utilização do mesmo.

Alguns destes parâmetros são relativos à:

- Produção de vapor de água em edifícios;
- Temperatura no interior dos edifícios;
- Ventilação.

Nos capítulos seguintes é realizada uma descrição das possíveis relações entre todos estes parâmetros. Esta exposição dará uma ideia global dos vários parâmetros e da complexidade das suas relações.

### 3.5. SÍNTESE DOS MODELOS/LIMITAÇÕES

A implementação de modelos estocásticos e métodos probabilísticos na física das construções tem bastante interesse. As áreas específicas de interesse são [14]:

- A incerteza dos parâmetros do edifício/materiais e das condições fronteira;
- Uma classificação sistémica da concepção/avaliação do critério de desempenho;
- Estrutura para a análise, avaliação e gestão do risco: definição do sistema, identificação do acontecimento indesejável, estimativa das probabilidades, consequência da modelação, análise de risco, critério de risco aceitável;
- Ferramentas simples e fiáveis para a análise de sensibilidade, modelação estocástica e avaliação de risco do desempenho da física do edifício.

Relativamente ao primeiro modelo apresentado, modelo solicitação-resistência, este apresenta algumas limitações que são necessárias referir:

1. Em primeiro lugar, esta metodologia é aplicável a problemas possíveis de modelar. Serão modeláveis os problemas em que a sua raiz está na física e no comportamento físico. Caso contrário, não será possível basear o estudo num esquema de análise do tipo da Fig.3.3;
2. Esta metodologia é facilmente aplicável quando se consegue chegar a uma função de desempenho. Isto implica tratar problemas linearizáveis. No entanto, e observando todas as variáveis que podem entrar num problema higrotérmico, conclui-se que muitos dos problemas não se podem reproduzir com uma única equação a fim de obter uma resposta. Pode ser necessário recorrer a sistemas de equações. Embora esta dificuldade não impeça a aplicação desta metodologia, a análise de fiabilidade torna-se mais complexa.
3. Esta metodologia permite utilizar a análise de risco para testar a fiabilidade de uma determinada solução face ao risco de ocorrência de uma patologia. Isto evidencia que a utilização desta metodologia é mais adequada a análise de um elemento isolado. Ora, nem sempre isso acontece. Haverá alguns acontecimentos indesejáveis que serão estudados a nível global (edifício) e não a nível isolado.

Uma dificuldade acrescida na aplicação do modelo solicitação-resistência verifica-se aquando da aplicação a problemas em regime dinâmico. O comportamento dinâmico, como facilmente se percebe, é muito mais complexo de modelar. Numa avaliação em regime dinâmico, muitos dos parâmetros que entram no modelo da Fig.3.3, apresentam a variável tempo na sua base. Isto condicionará a análise de risco efectuada. Em consequência disto, e com a perspectiva de dar uma análise mais global a esta modelação, serão efectuadas diferentes abordagens com diferentes níveis de complexidade.

Esta dificuldade patente no modelo solicitação-resistência é a principal vantagem do modelo dose-resposta. O modelo dose-resposta permite entrar com a evolução dos parâmetros em função do tempo. No capítulo 6 será identificado um acontecimento indesejável onde o tempo de exposição é fundamental para a sua análise e, por conseguinte, este modelo é adequado para o seu estudo.

Ambos os modelos apresentam dificuldades evidentes. No entanto, a dificuldade mais visível é o facto da sua aplicação ser um assunto novo, onde a falta de estudos relacionados com o seu desenvolvimento torna complexa a sua utilização.

## 4

APLICAÇÕES DO MODELO  
SOLICITAÇÃO-RESISTÊNCIA

## 4.1. ENQUADRAMENTO

Após a apresentação e explicação dos modelos de análise de risco, é necessário perceber onde estes modelos poderão ser aplicados. Neste capítulo serão apresentadas algumas aplicações do modelo solicitação-resistência, sendo o seu desenvolvimento/explicação concretizado de seguida.

Para a aplicação deste modelo é necessário, em primeiro lugar, identificar o acontecimento indesejável pelo qual a aplicação da análise de risco é possível através do modelo solicitação-resistência. Assim, o fenómeno físico com uma aplicação directa neste modelo é a **condensação**. Através deste fenómeno, como se verá de seguida, é possível realizar uma avaliação de risco e, assim, perceber qual a influência de certos parâmetros no problema em causa.

Após a apresentação da modelação do problema das condensações e dos respectivos parâmetros que entram nessa modelação, é discutido no capítulo 6 a variabilidade destes parâmetros para assim, estabelecer se estes podem ser considerados como variáveis aleatórias ou determinísticas no modelo de análise de risco.

Voltando ao acontecimento indesejável que será alvo desta análise de risco, interessa perceber qual a sua influência no comportamento higrotérmico em edifícios.

A ocorrência de condensações em elementos construtivos é um fenómeno que depende da sua constituição, das condições climáticas existentes e dos mecanismos de comportamento do ar húmido. Sempre que, em determinadas condições, o ar contacta com superfícies mais frias e a sua humidade absoluta atinge o limite de saturação para a temperatura em causa, ocorrerão condensações [15].

O comportamento do ar húmido depende da temperatura e da quantidade de vapor de água que contenha, a qual se designa por humidade absoluta,  $HA$ , podendo ser expressa em  $\text{g/m}^3$  ou  $\text{kg/kg}$ . Este vapor de água, existente por unidade de volume ou de massa de ar, exerce uma determinada pressão, que se designa por pressão parcial,  $P_p$ , (expressa em Pa), a qual será tanto maior quanto mais vapor de água existir. Mas a quantidade de vapor de água que a unidade de ar pode conter é finita, o que significa que acima desse valor o ar já não tem mais capacidade para absorver vapor de água, condensando as quantidades em excesso. A este valor limite da humidade absoluta atribui-se a designação de limite de saturação,  $W_s$ , ao qual corresponde uma pressão limite designada por pressão de saturação,  $P_s$  [15].

O conceito de humidade relativa,  $HR$ , de utilização frequente, apenas traduz a relação percentual entre a quantidade de vapor de água que existe por unidade de ar e o respectivo limite de saturação, ou a relação equivalente entre a pressão parcial e a pressão de saturação.

$$HR = \frac{HA}{W_s} \times 100 = \frac{P_p}{P_s} \times 100 \quad (4.1)$$

A questão é, contudo, um pouco mais complicada na medida em que o limite de saturação (e a respectiva pressão de saturação) não é constante, antes variando em função da temperatura. É assim que se explica que o ar aumenta de humidade relativa quando arrefece (já que diminui o limite de saturação), e diminui a humidade relativa quando aquece, em qualquer dos casos mantendo-se constante a humidade absoluta. Nestas condições, sempre que o ar contacta com zonas mais frias dos elementos de construção, o valor da humidade absoluta pode ultrapassar o limite de saturação, ocorrendo condensações [15].

Deve referir-se que as condensações tanto podem surgir à superfície dos elementos, situação em que se designam como **superficiais**, como no seu interior, designando-se então como **internas**.

Em relação às condensações superficiais, estas podem dividir-se em interiores e exteriores.

Assim, e percebendo que o fenómeno de condensações tem diferentes análises dependendo do local onde surjam, o estudo que se segue terá como base três subcapítulos, nomeadamente:

- Condensações Superficiais Interiores;
- Condensações Internas;
- Condensações Superficiais Exteriores.

## 4.2. CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS INTERIORES

### 4.2.1. PROCESSO FÍSICO

A humidade de condensação resulta do vapor de água gerado no interior dos edifícios. Com efeito, quando existe na atmosfera uma quantidade de vapor de água próxima da máxima que o ar pode conter à temperatura a que se encontra e, por outro lado, a capacidade de ventilação não é suficiente para o remover, este condensa em contacto com as zonas mais frias dos paramentos [15].

A quantificação dos fluxos de humidade que se deslocam e eventualmente se depositam num dado elemento de construção depende das características higrométricas dos materiais que constituem as diferentes camadas e das condições climáticas interiores e exteriores. Visto isto, pode facilmente concluir-se que as condições climáticas interiores têm muita influência no fenómeno das condensações superficiais interiores. Um parâmetro bastante útil que relaciona os principais factores que caracterizam as condições climáticas interiores é a **higrometria** ( $\omega/n.V$ ). A higrometria traduz o aumento da humidade interior em relação à humidade exterior e consequentemente define o gradiente de pressão de vapor a que se encontra submetida a envolvente [16]. A relação entre a humidade interior e exterior pode traduzir-se pela seguinte expressão:

$$HA_i = HAE + \frac{\omega}{n.V} \times 0,825 \quad (4.2)$$



em que:

- $H_{Ai}$  – Humidade Absoluta interior (g/kg);
- $H_{Ae}$  – Humidade Absoluta exterior (g/kg);
- $\omega$  – Produção de vapor no interior (g/h);
- $n$  – Número de renovações horárias ( $\text{h}^{-1}$ );
- $V$  – Volume interior ( $\text{m}^3$ ).

As relações existentes entre a humidade absoluta e relativa e a temperatura do ar podem ser expressas através de um diagrama específico, designado por **diagrama psicrométrico**, como o exemplo da Fig.4.1. Este diagrama permite entender mais facilmente os conceitos referidos, apresentando em abcissas os valores da temperatura do ar (em  $^{\circ}\text{C}$ ), em ordenadas os valores da humidade absoluta (em  $\text{g}/\text{m}^3$ ) e da pressão de saturação (em Pa) e um conjunto de curvas de humidade relativa (em %). Este diagrama é sempre relativo a uma determinada pressão atmosférica, em geral a pressão atmosférica de referência, pelo que se deve proceder às respectivas correcções se a pressão atmosférica for diferente daquela a que corresponde o diagrama [16].

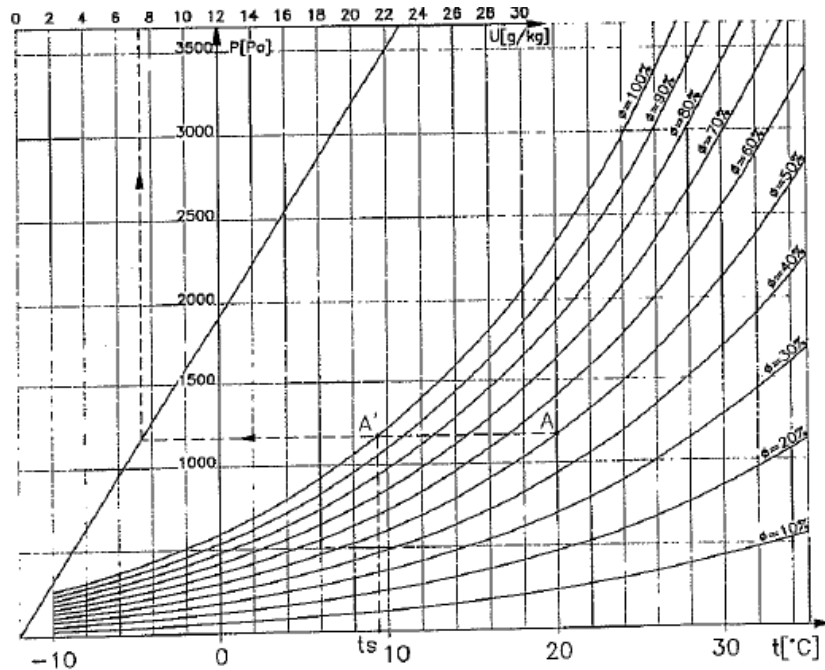


Fig. 4.1 – Exemplo de um diagrama psicrométrico [16]

As linhas horizontais representam pontos com igual humidade absoluta e as verticais pontos com igual temperatura; cada uma das curvas do diagrama é constituída por pontos de igual humidade relativa.

Valores aproximados das pressões de saturação (em Pa) podem ser obtidos recorrendo a uma expressão empírica [16]:

$$P_s = 611 \times e^{\left(\frac{a \times t}{t' + t}\right)} \quad (4.3)$$

em que  $t$  é a temperatura (em °C) e  $t'$  e  $a$  são constantes que assumem valores diferentes para temperaturas positivas ou negativas:

para  $t < 0$   $a = 22,44$   $t' = 272,44$

para  $t \geq 0$   $a = 17,08$   $t' = 234,18$

A humidade absoluta,  $HA$ , pode ser determinada em  $\text{g/m}^3$  a partir dos valores da pressão parcial  $Pp$  (ou de saturação em Pa) e da temperatura  $t$  (em °C) através da expressão [16]:

$$HA = \frac{Pp}{t + 273} \quad (4.4)$$

#### 4.2.2. MODELAÇÃO DO PROBLEMA

Visto este fenómeno ter uma análise significativamente simples, percebe-se através da análise do processo físico realizada anteriormente, que os parâmetros envolvidos neste fenómeno são:

- **Humidade absoluta exterior;**
- **Temperatura do ar exterior;**
- **Coeficiente de transmissão térmica;**
- **Temperatura do ar interior;**
- **Produção de vapor;**
- **Ventilação.**

No caso de admitir-se o estudo em regime permanente, será relativamente simples saber se há condensações superficiais interiores. Nestas condições é possível determinar a temperatura superficial interior ( $\theta_{si}$ ) de qualquer elemento construtivo, desde que sejam conhecidos o seu coeficiente de transmissão térmica  $U$  (em  $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ) e as temperaturas dos dois ambientes que esse elemento separe. Esta explicação traduz-se no modelo físico do fenómeno em causa, que pode ser descrito através da seguinte equação:

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} \times U \times (\theta_i - \theta_e) \quad (4.5)$$

em que:

- $\theta_{si}$  – Temperatura superficial interior do elemento (°C);
- $\theta_i$  – Temperatura da ambiência interior (°C);
- $R_{si}$  – Resistência térmica superficial interior (em  $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ );
- $U$  – Coeficiente de transmissão térmica do elemento ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).
- $\theta_e$  – Temperatura da ambiência exterior (°C);

A expressão (4.5) tem como objectivo descrever o estado físico presente no local, sendo considerada a *função de desempenho* no modelo solicitação-resistência.

A comparação da temperatura superficial interior ( $\theta_{si}$ ) com a temperatura de ponto do orvalho ( $\theta_{po}$ ) indica a presença, ou não, de condensações superficiais. A temperatura de ponto de orvalho é uma característica do ar e pode ser definida a partir do conhecimento dos valores da humidade absoluta exterior, da produção de vapor e da ventilação.

Se  $\theta_{si} \geq \theta_{po}$  não há ocorrência de condensações. Pelo contrário, se  $\theta_{si} < \theta_{po}$  há ocorrência de condensações superficiais. No modelo solicitação-resistência, esta verificação traduz o *limite de serviço* pelo qual o risco de ocorrência de condensações se baseia.

Em suma, é possível representar esta análise através da figura que se segue. A partir desta figura, passa-se a conhecer os parâmetros envolvidos no fenómeno das condensações superficiais interiores.

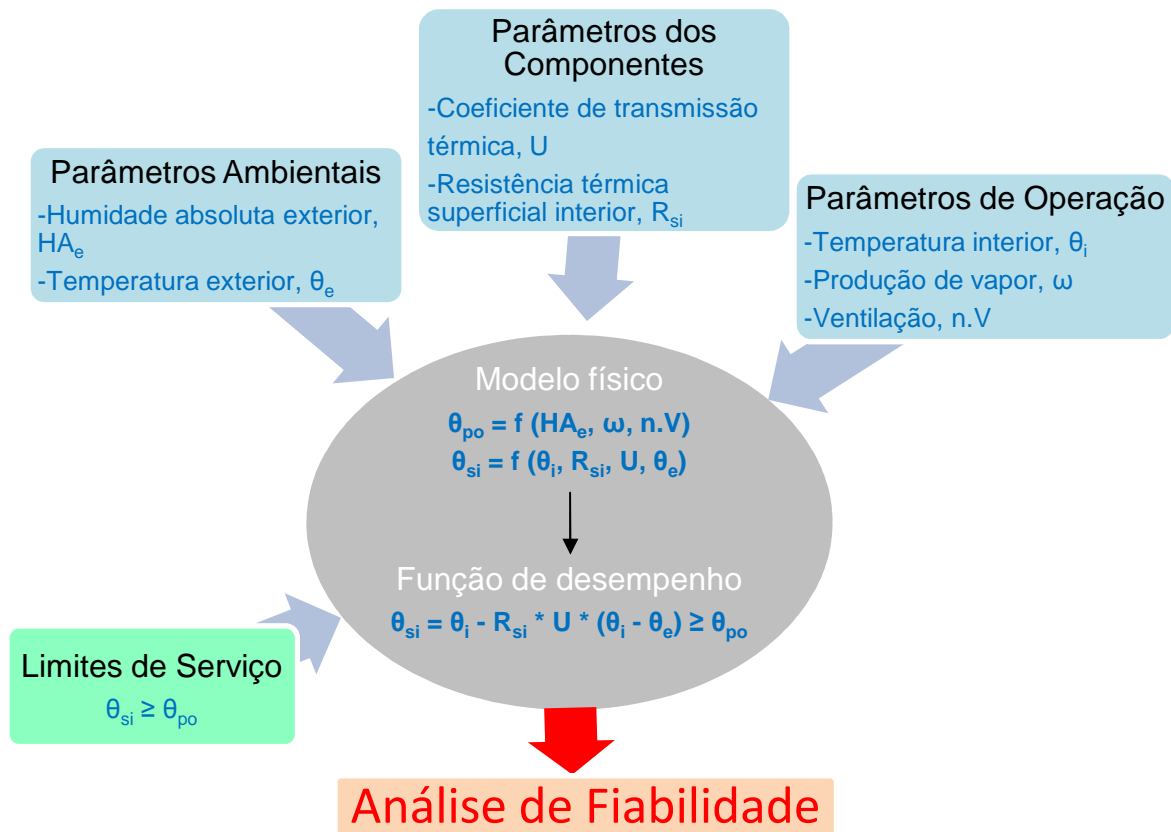


Fig. 4.2 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações superficiais interiores

A análise de fiabilidade é possível realizar segundo esta abordagem, pois o critério de desempenho definido baseia-se na ocorrência ou não de condensações. No entanto, se outra abordagem fosse seguida, poderia não ser possível realizar uma análise de fiabilidade. Essa abordagem poderia estabelecer como critério de desempenho o aparecimento, ou não, de bolores ou a formação de manchas escuras

em zonas dos paramentos correspondendo a pontes térmicas, devido ao depósito de poeiras nessas zonas e à sua retenção pela humidade de condensação. Se este critério fosse seguido, seria impossível, com o conhecimento actual, definir os limites de serviço pondo em causa a realização da análise de fiabilidade.

Neste caso, o modelo dose-resposta poderia ser o mais adequado. No entanto, esta abordagem não vai ser seguida para este acontecimento indesejável.

### 4.3. CONDENSAÇÕES INTERNAS – REGIME PERMANENTE

#### 4.3.1. PROCESSO FÍSICO – REGIME PERMANENTE

Para estudar o comportamento à humidade da envolvente dos edifícios é necessário analisar as diversas formas de manifestação, nomeadamente as condensações internas resultantes da difusão do vapor de água entre o interior e o exterior dos edifícios.

A ocorrência de condensações internas dá origem ao aparecimento não programado de água nos elementos construtivos, podendo resultar no desenvolvimento de diversas formas de degradação de gravidade variável.

Sempre que existam diferenças de pressão de vapor de água entre os dois ambientes que o elemento de construção separe, ocorrerão inevitavelmente fenómenos de difusão de vapor através desse elemento. Existindo um diferencial de temperaturas, a cada ponto do interior do elemento corresponderá uma temperatura diferente e, conseqüentemente, uma determinada pressão de saturação. Se em qualquer zona interior do elemento a pressão parcial, correspondente à difusão de vapor de água através do elemento, superar a respectiva pressão de saturação, ocorrerão condensações nessa zona. Os fenómenos de difusão de vapor de água através de um elemento de construção dependem das pressões parciais em cada um dos dois ambientes com ele confinantes e das características de permeabilidade de cada um dos vários materiais que o constituam [15].

#### 4.3.2. MODELAÇÃO DO PROBLEMA

A modelação completa da transferência de humidade em materiais porosos é extremamente complexa (Fig.4.3) e de difícil aplicação em Engenharia Civil, sendo, por isso, correntemente aplicado o **Método** simplificado de **Glaser** que permite quantificar os fluxos de vapor de água e as condensações internas.

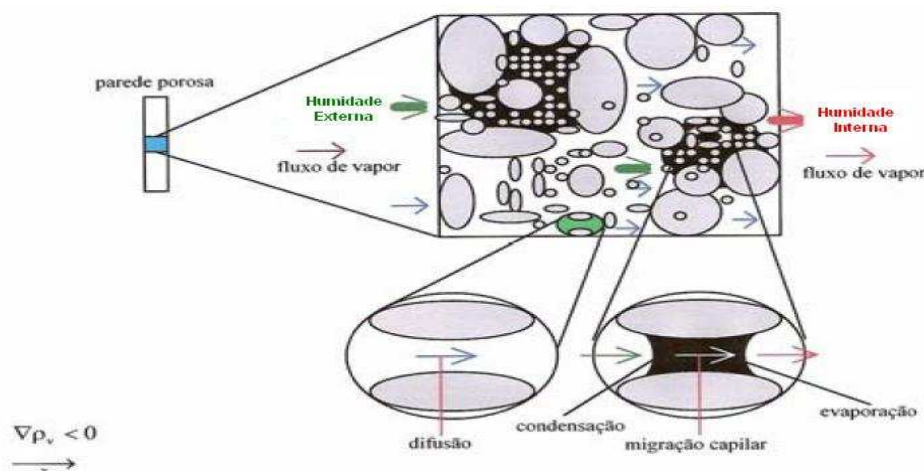


Fig. 4.3 – Transferência de humidade numa parede porosa [17]

Antes de se analisar este método, é necessário perceber quais as suas condições de aplicação [18]:

- A humidade desloca-se apenas por transferência de vapor de água;
- Não há transporte de ar – a transferência de vapor deve-se apenas à difusão;
- A difusão de vapor de água obedece à Lei de Fick;
- O transporte de calor dá-se apenas por condução;
- O regime é permanente;
- Materiais porosos e macroscopicamente homogêneos;
- Os materiais são não-higroscópicos;
- Os elementos de construção são não permeáveis ao ar;
- Os elementos de construção têm as faces planas e paralelas;
- Os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e de condutibilidade térmica são constantes;
- Não há movimento (redistribuição) do vapor de água condensado.

Feita esta introdução e conhecendo quais as condições de aplicação do método de Glaser, interessa desenvolver a sua metodologia. Este método baseia-se na Lei de Fick, a partir da seguinte expressão [16]:

$$g = -\pi(T, HR) \cdot \frac{dP}{dx} \quad (4.6)$$

em que:

- $g$  – Densidade do fluxo de difusão de vapor de água ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ );
- $dP/dx$  – Gradiente de pressão de vapor de água ( $\text{Pa/m}$ );
- $\pi(T, HR)$  – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, em função da temperatura e da humidade relativa ( $\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$ ).

Ou seja, para determinar a densidade de fluxo de difusão de vapor de água interessa conhecer o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, o gradiente de pressão de vapor de água e as características da camada. É necessário realçar que se considera o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água constante no desenvolvimento deste método, embora não seja verdade. A permeabilidade ao vapor de água é o parâmetro higrotérmico que permite estudar a difusão de vapor.

Define-se **permeabilidade ao vapor de água** de um material,  $\pi$ , como a quantidade de vapor que atravessa a unidade de superfície por espessura unitária desse material, por unidade de tempo e quando a diferença de pressões entre as duas faces do material é também unitária (em  $\text{kg/m.s.Pa}$ ) [16].

Para materiais que são usados com espessuras constantes usa-se frequentemente a noção de permeância  $\pi/e$  definida como o quociente da permeabilidade pela espessura em causa (em  $\text{kg/m}^2.\text{s.Pa}$ ).

O inverso da permeância designa-se por resistência à difusão,  $R_d$  (em  $\text{m}^2.\text{s.Pa/kg}$ ).

Frequentemente, são também usadas as noções de **factor de resistência à difusão do vapor de água**,  $\mu$ , definida como a relação adimensional entre a permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade do material, que em unidades SI assume a forma [16]:

$$\mu = \frac{1,852 \times 10^{-10}}{\pi} \quad (4.7)$$

e ainda a noção de espessura da camada de ar de difusão equivalente  $Sd$  que corresponde a uma grandeza de carácter prático destinada a substituir uma camada do material com uma dada espessura por uma camada de ar de espessura tal que tenham a mesma permeância. Em unidades SI esta grandeza pode ser calculada através da expressão [16]:

$$Sd = \frac{1,852 \times 10^{-10}}{\pi/e} = \mu \times e \quad (4.8)$$

Frequentemente a análise através do método de Glaser é conduzida de forma gráfica através da representação do elemento construtivo em corte (Fig. 4.4). A possibilidade de realizar uma análise gráfica traz uma grande vantagem na utilização deste método. Assim, através de uma análise gráfica, é possível verificar a existência de condensações internas seguindo as seguintes fases [16]:

1. Representa-se o elemento construtivo num sistema de eixos ( $R_d$ ;  $P$ );
2. Utilizando a Lei de Fourier, traça-se a curva de temperaturas no meio do elemento de construção. Esta curva é muito importante pois é a partir dela que se determina a pressão de saturação. A curva de temperaturas pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$q = \frac{1}{\sum_j \frac{e_j}{\lambda_j}} \times (\theta_i - \theta_e) \quad (4.9)$$

em que,

- $q$  – Fluxo de calor por unidade de superfície ( $W/m^2$ );
- $\lambda_j$  – Coeficiente de condutibilidade térmica ( $W/m \cdot ^\circ C$ );
- $\theta_i, \theta_e$  – Temperatura interior e exterior, respectivamente ( $^\circ C$ );
- $e_j$  – Espessura (m).

Utilizando a Lei de Fick traça-se a curva de pressões de saturação, com a ajuda do diagrama psicrométrico. Considerando um elemento de construção constituído por materiais homogéneos, de faces planas e paralelas e recorrendo à Lei de Fick, pode escrever-se a seguinte expressão [15]:

$$g = \frac{1}{\sum_j \frac{e_j}{\pi_j}} \times (P_i - P_e) \quad (4.10)$$

em que,

- $g$  – Fluxo de difusão de vapor de água por unidade de superfície ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ );
- $\pi_j$  – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água na camada  $j$  ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ );
- $e_j$  – Espessura da camada  $j$  (m);
- $P_i, P_e$  – Pressão parcial de vapor de água no interior e no exterior, respectivamente (Pa).

3. Comparar a curva de pressões de saturação com a curva das pressões de vapor geradas pelas condições limite. Se as curvas não se intersectarem, então não há condensações. Se, pelo contrário, as curvas se intersectarem, ocorrem condensações.

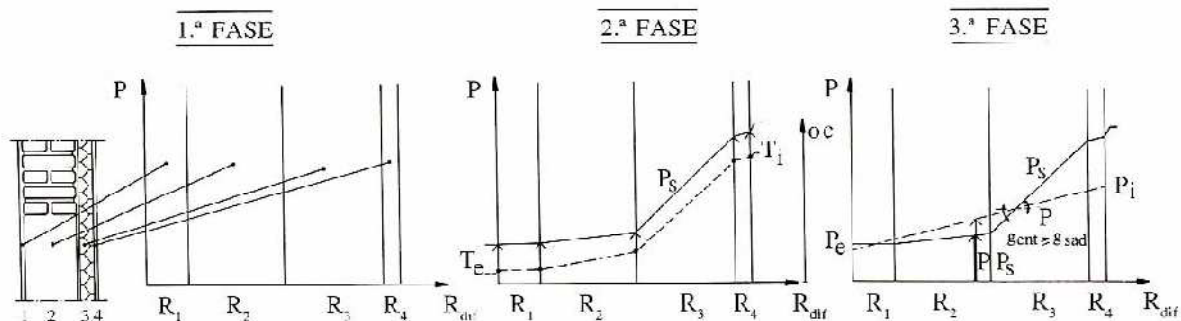


Fig. 4.4 – Verificação gráfica da existência de condensações internas [15]

Em suma, a aplicação do método de Glaser exige o conhecimento dos seguintes parâmetros:

- Condições climáticas interiores e exteriores ( $\theta_i, P_i, \theta_e, P_e$ );
- Propriedades dos materiais que constituem as diferentes camadas ( $\pi_j, \lambda_j$ );

A verificação da ocorrência de condensações internas num elemento construtivo tem que obedecer ao seguinte critério:  $P_i < P_s$ .

A definição de uma função de desempenho é impossível neste caso. Isto acontece pois não existe uma relação directa entre  $P_i$  e  $P_s$ . Tanto a pressão de saturação como a pressão interior dependem das condições fronteira, tornando assim a função de desempenho implícita. A Fig. 4.4 complementa este raciocínio.

A partir da análise feita do fenómeno das condensações internas e depois de perceber o modelo de solicitação-resistência desenvolvido no capítulo anterior, é possível ilustrar através da figura (Fig.4.5) uma possível abordagem a este acontecimento indesejável.

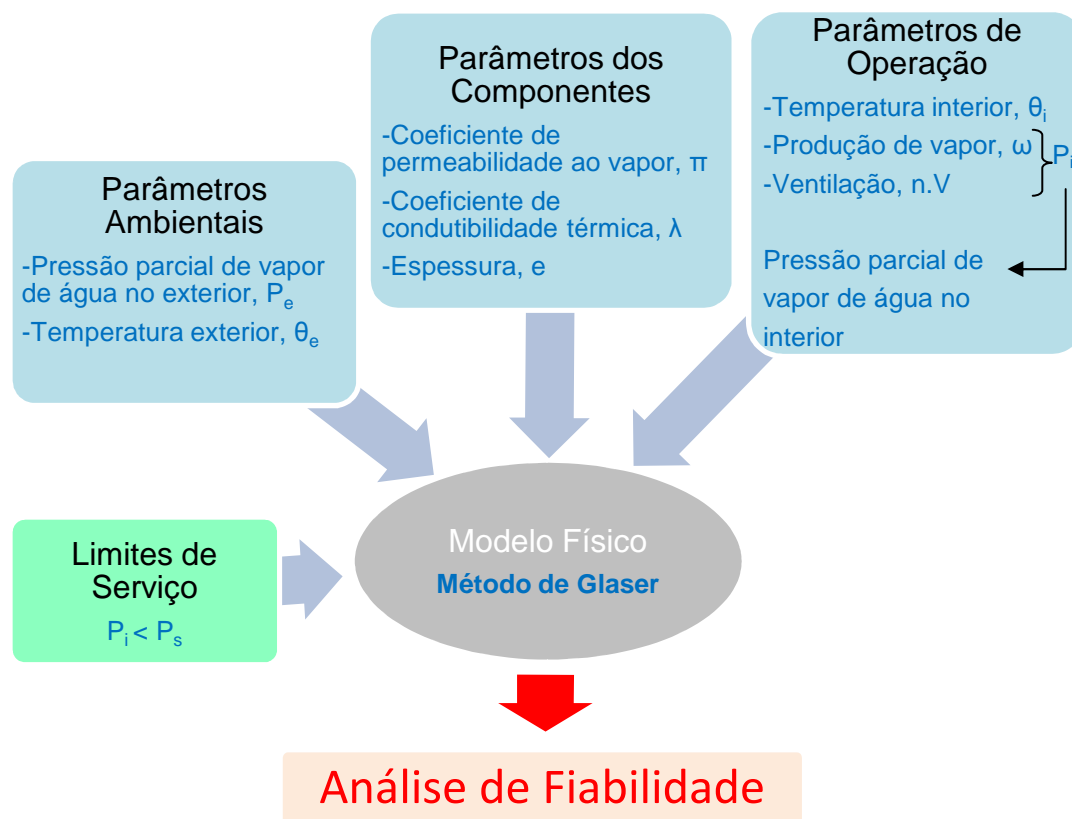


Fig. 4.5 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações internas em regime permanente

É necessário referir que o problema de avaliar a probabilidade de ocorrência de condensações internas teve um desenvolvimento significativo nos últimos anos. O programa Condensa 13788 desenvolvido em colaboração com o Laboratório de Física das Construções – FEUP, segue o método de Glaser e efectua a análise em regime permanente.

O programa Condensa 13788, como o próprio nome indica, segue o método de cálculo preconizado pela norma EN 13788 [19].

Os resultados obtidos nas análises efectuadas por este programa deverão ser considerados como uma aproximação à realidade e ser utilizados, para do ponto de vista do comportamento higrotérmico, comparar diferentes elementos de construção e/ou avaliar os efeitos de possíveis modificações na construção de cada elemento.



Assim, é possível representar esta análise através da seguinte figura:

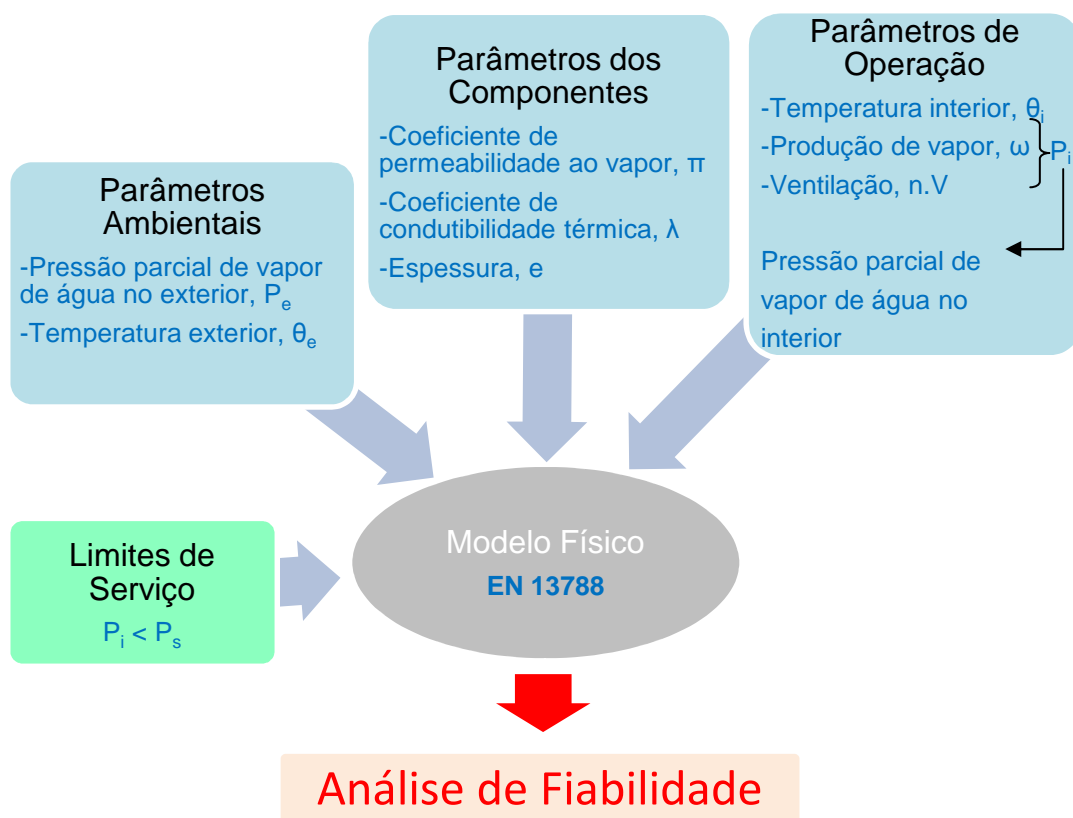


Fig. 4.6 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações internas em regime permanente – Aplicação da Norma 13788

#### 4.4. CONDENSAÇÕES INTERNAS – REGIME VARIÁVEL

##### 4.4.1. ENQUADRAMENTO

A modelação dos mecanismos de transporte em elementos construtivos obriga à adopção de simplificações de maior ou menor grau, dependendo do detalhe com que se pretende abordar o problema [2].

Em 4.3 foi abordada a análise em regime permanente. No entanto, a avaliação de risco de condensações internas pode beneficiar com a utilização de modelos de simulação numérica com diferentes níveis de complexidade. Depois da análise das condensações internas em regime permanente, recorrendo à norma EN ISO 13788, tem interesse abordar um modelo mais complexo suportado pelo programa WUFI 4.2 onde o estudo das condensações internas é estudado em regime variável.

O modelo utilizado pelo programa WUFI 4.2 baseia-se na norma EN 15026 [20].

#### 4.4.2. PROCESSO FÍSICO

##### 4.4.2.1. ARMAZENAMENTO DE HUMIDADE E MECANISMOS DE TRANSPORTE

O sucesso da aplicação de modelos de simulação nos processos hídricos e térmicos (não estacionários), em componentes de edifícios, requer algum conhecimento básico acerca das propriedades de armazenamento e transporte de humidade em materiais de construção [21].

Existem materiais de construção higroscópicos e não higroscópicos. Se um material é higroscópico, supondo inicialmente uma amostra seca, esta irá absorver a humidade do ar até alcançar a humidade de equilíbrio correspondente às condições ambiente. Uma vez que a absorção de vapor de água depende principalmente da humidade relativa ambiente, considerando que a temperatura ambiente tem menos influência, o armazenamento da humidade higroscópica é descrito por meio das curvas de adsorção específicas do material [21].

A Fig.4.7 mostra curvas de adsorção para três materiais de construção que diferem, principalmente, na sua higroscopicidade.

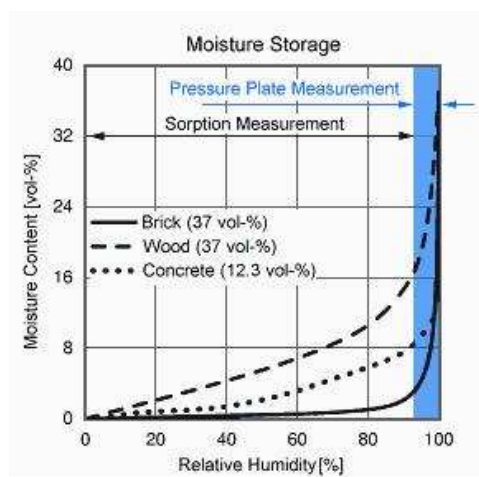


Fig. 4.7 – Curvas de adsorção para três materiais de construção [21]

Em materiais de construção porosos os mecanismos de transporte de humidade predominantes são a difusão ao vapor, a difusão superficial e a condução por capilaridade.

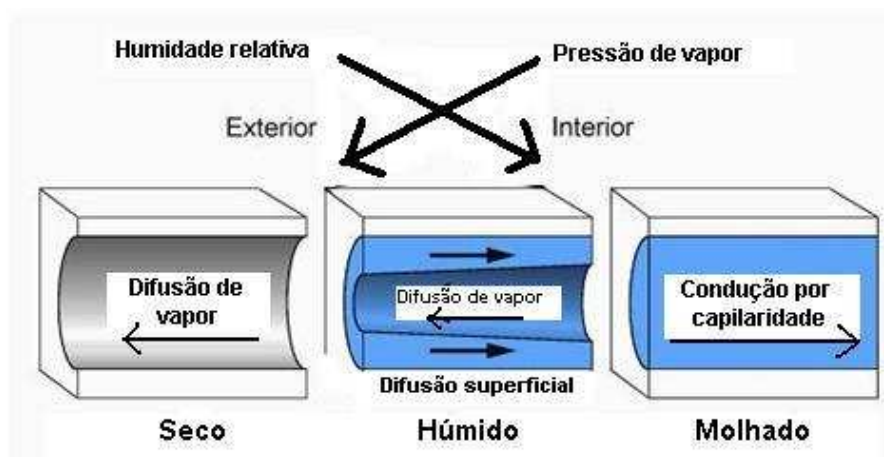


Fig. 4.8 – Mecanismos de transporte de humidade [21]

O efeito combinado dos mecanismos de transporte de humidade predominantes, em cima mencionados, está ilustrado na Fig.4.8. Em ambos os lados das condições fronteira de capilaridade típicas são assumidas como as que se encontram na prática (exemplo: a pressão de vapor é maior no lado interior e a humidade relativa é maior no lado exterior). Se um material é suficientemente seco ou não higroscópico, então o vapor de água propagar-se-á do interior para o exterior, seguindo a direcção da maior para a menor pressão de vapor.

#### 4.4.2.2. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DOS MATERIAIS

Os resultados da simulação computacional serão bons dependendo dos parâmetros dos materiais utilizados. Durante muito tempo a notória falta de dados fiáveis de materiais foi um obstáculo. Serão apresentados a seguir quais os parâmetros actualmente necessários para diferentes tipos de investigação. Em geral, as propriedades dos materiais que se seguem são as necessárias para uma análise não-estacionária das temperaturas [21]:

- **Massa volúmica** ( $\rho$ );
- **Calor específico** ( $c_p$ );
- **Condutibilidade térmica** ( $\lambda$ ).

As propriedades hígricas que precisam de ser conhecidas para todos os materiais (também para os materiais não higroscópicos) são:

- **Factor de resistência à difusão do vapor de água** ( $\mu$ );
- **Porosidade** ( $\square$ ).

Se o comportamento higroscópico dos materiais e a sua capilaridade precisam de ser simulados correctamente, a **função de armazenamento de humidade** (Fig.4.8) e os **coeficientes de transporte líquido** (Fig.4.9) necessitam de ser conhecidos igualmente. Para estes coeficientes o processo específico de diferenciação mostrado na figura (Fig.4.9) provou ser vantajoso. A razão deve-se ao facto da absorção por capilaridade através de materiais minerais em contacto com a água ser um processo muito mais rápido do que a redistribuição capilar ou o processo de secagem depois do abastecimento de água terminar.

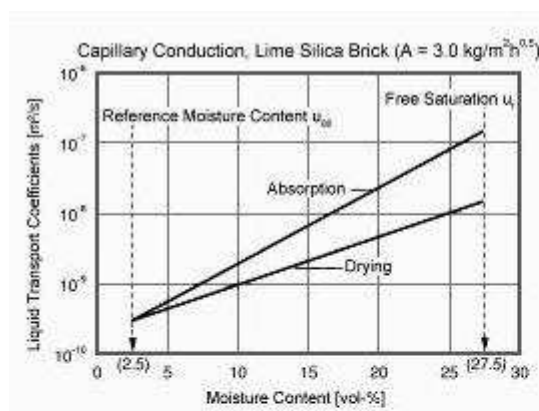


Fig. 4.9 – Exemplos de coeficientes de transporte líquido [21]

#### 4.4.2.3. CLIMA

As condições climáticas exteriores que actuam no componente são a **temperatura do ar**, a **humidade relativa**, a **radiação solar** e a **precipitação**. A radiação e a precipitação dependem da inclinação e orientação da componente e devem ser analisadas para o componente específico. Adicionando a isto, a **velocidade do vento** e a sua **directão** bem como a exposição do edifício ao vento precisam de ser conhecidos para determinar a precipitação associada ao vento [21].

#### 4.4.3. MODELAÇÃO DO PROBLEMA

Vários modelos de simulação higrotérmica têm sido desenvolvidos em diferentes países. A descrição que se segue discute o modelo de base para o programa WUFI (**W**ärme- **U**nd **F**euchtetransport **I**ntation**r**). Neste modelo os processos de transporte de humidade e de calor, não estacionário, em componentes de edifícios são descritos a partir das equações diferenciais que se seguem:

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad \text{Transporte de calor} \quad (4.11)$$

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad \text{Transporte de humidade} \quad (4.12)$$

em que:

- $D_w$  [m<sup>2</sup>/s] – Coeficiente de transporte líquido;
- $H$  [J/m<sup>3</sup>] – Entalpia;
- $h_v$  [J/kg] – Entalpia de evaporação de água;
- $p$  [Pa] – Pressão parcial de vapor de água;
- $u$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] – Quantidade de água;
- $\delta$  [kg/msPa] – Coeficiente de difusão de vapor de água no ar;
- $\theta$  [°C] – Temperatura;
- $\lambda$  [W/mK] – Condutibilidade térmica;
- $\mu$  [-] – Factor de resistência à difusão de vapor de água do material seco;
- $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] – Densidade da água;
- $\varphi$  [-] – Humidade relativa

A partir deste modelo físico é possível conhecer a variação, ao longo do tempo, do teor de humidade no elemento construtivo em cada uma das suas camadas. Outro resultado importante que este modelo dará será o perfil de humidade do elemento construtivo, para momentos no tempo previamente estabelecidos [22].

Esta informação possibilita uma melhor avaliação de risco comparativamente ao estudo em regime permanente, dado que se pode correlacionar directamente com o nível de danos que cada material poderá sofrer em cada ciclo anual [22].

Na análise de fiabilidade para o regime dinâmico é necessário ter em conta um aspecto importante. Observando as equações que traduzem o modelo físico para as condensações internas em regime dinâmico, conclui-se que estas não são lineares. Logo, trata-se de um problema não linearizável o que acarreta a exclusão de uma *função de desempenho* específica.

Em suma, pode representar-se esta análise por meio da Fig. 4.10.

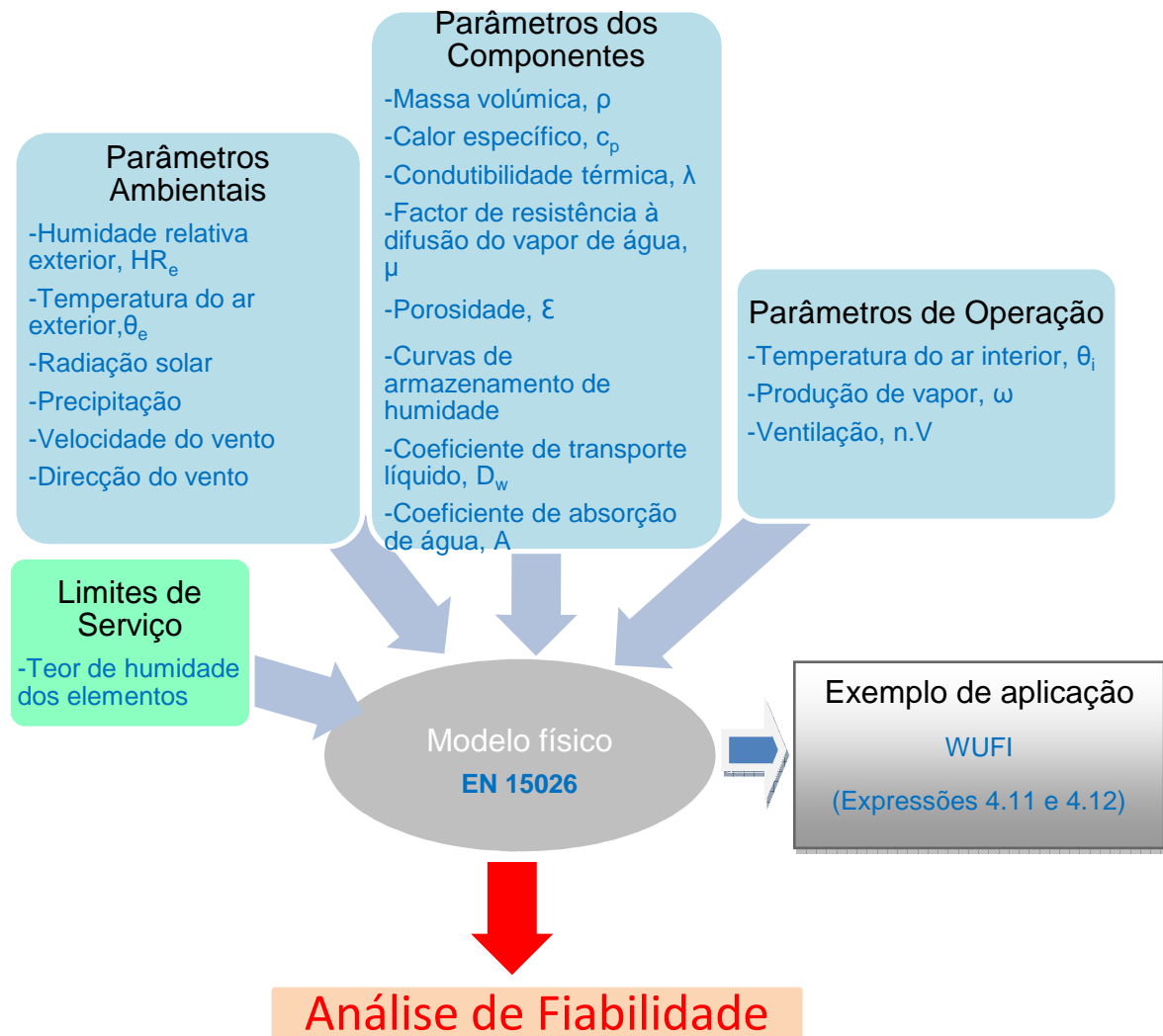


Fig. 4.10 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações internas em regime variável

## 4.5. CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS EXTERIORES

### 4.5.1. PROCESSO FÍSICO

O desenvolvimento escrito do problema das condensações superficiais exteriores é apoiado num estudo realizado no LFC (Laboratório de Física das Construções) - FEUP [23]. O objectivo principal deste estudo foi fazer uma análise de sensibilidade aos parâmetros críticos (ambientais, componentes e de operação/utilização) envolvidos no fenómeno em causa. Através desta análise, foi possível identificar quais os parâmetros mais importantes para a análise e distinguir quais deveriam ser tratados como variáveis aleatórias ou determinísticas.

A tecnologia ETICS (External Thermal Insulation Systems for walls) é muito interessante para o uso prático, principalmente devido às vantagens térmicas que traz. No entanto, esta tecnologia tem que enfrentar um sério problema: a sua degradação do aspecto, devido ao crescimento de microrganismos.

A condensação superficial é o problema específico para a tecnologia ETICS. Sabe-se que as trocas por radiação entre a superfície exterior e a atmosfera, durante a noite, causam a diminuição da temperatura na superfície do ETICS. A condensação forma-se quando a temperatura superficial exterior é mais baixa que a temperatura do ponto de orvalho. Se o processo de secagem não é suficientemente rápido, a quantidade de humidade na superfície mantém-se alta por longos períodos e, assim, aumenta o risco do crescimento de microrganismos.

Devido à sua fina camada exterior, que se traduz numa baixa inércia térmica, a tecnologia ETICS é muita vulnerável às trocas radiativas entre a sua superfície e a atmosfera.

O balanço radiativo na fachada de um edifício é afectado pela *radiação do edifício*, *radiação do céu* e pela *radiação da superfície da terra*.

Um edifício emite uma radiação com uma intensidade,  $E_b$ , calculada através da lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \varepsilon_b \cdot \sigma \cdot T_b^4 \quad (4.13)$$

em que:

- $E_b$  – Emissividade da superfície;
- $\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann;
- $T_b$  – Temperatura da superfície.

Por outro lado, a fachada absorve parte da radiação de onda longa emitida pelos objectos circundantes (radiação terrestre) e pelo céu (radiação atmosférica).

A radiação emitida através da superfície é maior do que aquela que penetra na superfície, causando assim uma perda de radiação para o céu. Este balanço negativo, que não é compensado através da radiação solar durante a noite, causa um decréscimo na temperatura superficial do edifício. Esta situação mantém-se até que o transporte de calor por convecção e por condução compensar a perda por radiação. A condensação aparece sempre que a temperatura superficial é mais baixa que a temperatura do ponto de orvalho. Assim, explica-se as condições favoráveis para o crescimento de microrganismos devido à acumulação de água condensada.

#### 4.5.2. MODELAÇÃO DO PROBLEMA

O crescimento de microrganismos no ETICS depende, entre outros parâmetros, da sua humedificação superficial num certo período de tempo, durante o qual as condições de temperatura ideais e a quantidade de humidade podem ser mantidas. A humedificação superficial é devida à chuva e à condensação de vapor. A quantidade de humidade disponível na superfície da parede é, também, influenciada pelas condições de secagem que, no caso de serem intensas, reduzirá o período de tempo no qual as condições para o crescimento microbiológico são ideais.

Para avaliar o risco associado à degradação do aspecto devido ao crescimento de microrganismos no ETICS, têm sido realizados estudos nos últimos anos que permitem perceber o seu comportamento higratérmico. Através destes estudos, é possível conhecer em pormenor o fenómeno físico e, assim, desenvolver modelos matemáticos para a simulação do desempenho do ETICS, considerando diferentes condições de utilização. Embora existam estes estudos, ainda não existe um processo simples para prever o risco da degradação do aspecto do ETICS.

Sendo assim, a única possibilidade será recorrer à análise de risco abordando a natureza incerta do problema com o objectivo de desenvolver novas soluções para a tecnologia ETICS. Através do conhecimento razoável da viabilidade das soluções para esta tecnologia, evitar-se-á aplicações com uma elevada probabilidade de mau comportamento higratérmico.

A definição de um modelo probabilístico aplicado à análise de fiabilidade da tecnologia ETICS, relativamente ao crescimento de microrganismos, é um assunto complexo que impossibilita, por agora, realizar uma análise de fiabilidade. O conhecimento actual ainda não permite definir um modelo de análise de risco que tenha em conta o crescimento de microrganismos.

A análise da condensação superficial exterior baseia-se nos princípios da psicrometria. A diferença entre a pressão parcial do vapor de água no ar perto da superfície,  $P_v(ar)$ , e a pressão de saturação do vapor de água junto à superfície,  $P_s(sup.)$ , pode ser designada como Condensação Potencial ( $CP$ ).

$$CP = P_v(ar) - P_s(sup.) \quad (4.14)$$

Valores positivos acumulados de Condensação Potencial [ $(CP > 0)_{\text{acumulado}}$ ], durante um certo período de tempo, permitem estimar a quantidade de vapor de água que está disponível para condensar no período de tempo considerado.

Este modelo permite realizar uma comparação dos valores de  $CP$  de um conjunto de soluções adoptadas. No entanto, não permite decidir se um dado valor de  $CP$  tem um risco aceitável ou, pelo contrário, tem um risco elevado para o aparecimento de microrganismos.

Em rigor, a definição dos *Limites de Serviço* deveria ter em conta a avaliação do crescimento e desenvolvimento dos microrganismos na fachada do edifício. No entanto, devido à complexidade destes processos, recorre-se simplesmente à quantificação das condensações. Visto isto, não é possível estabelecer uma ligação directa entre o valor de  $CP$  e o desenvolvimento de microrganismos. Logo, o limite de serviço não é conhecido, ou seja, considera-se como uma incógnita no modelo de análise de risco.

Relativamente aos parâmetros que servem de *input* para o modelo probabilístico, foram analisados recorrendo a uma análise de sensibilidade, baseada em simulações numéricas. Os resultados provenientes da análise de sensibilidade suportam a discussão sobre a relevância de cada parâmetro para o este fenómeno. Esta análise de sensibilidade será apresentada no capítulo 6.

Assim, apoiando a análise de sensibilidade numa simulação numérica, foi usado o software WUFI 4 para perceber qual a influência destes parâmetros no comportamento da Condensação Potencial (CP).

As simulações foram executadas usando uma parede como mostra a Fig. 4.11. Os materiais usados em cada camada foram seleccionados da base de dados do WUFI, o qual também fornece as propriedades hígricas e térmicas dos materiais. Relativamente às condições iniciais, a parede foi assumida com tendo uma localização no Porto e com direcção Norte. Os dados climáticos horários foram gerados pelo METEONORM – versão 6.

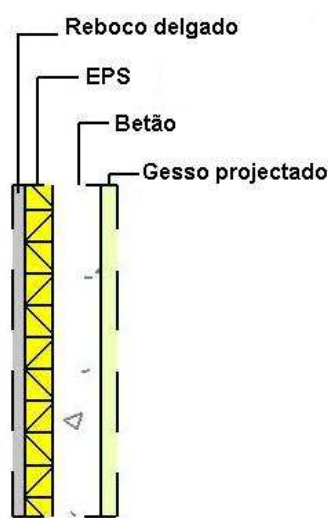


Fig.4.11 – Parede em estudo

Em síntese, o modelo probabilístico de análise de risco (modelo solicitação-resistência) adoptado para este acontecimento indesejável está presente na figura 4.12.



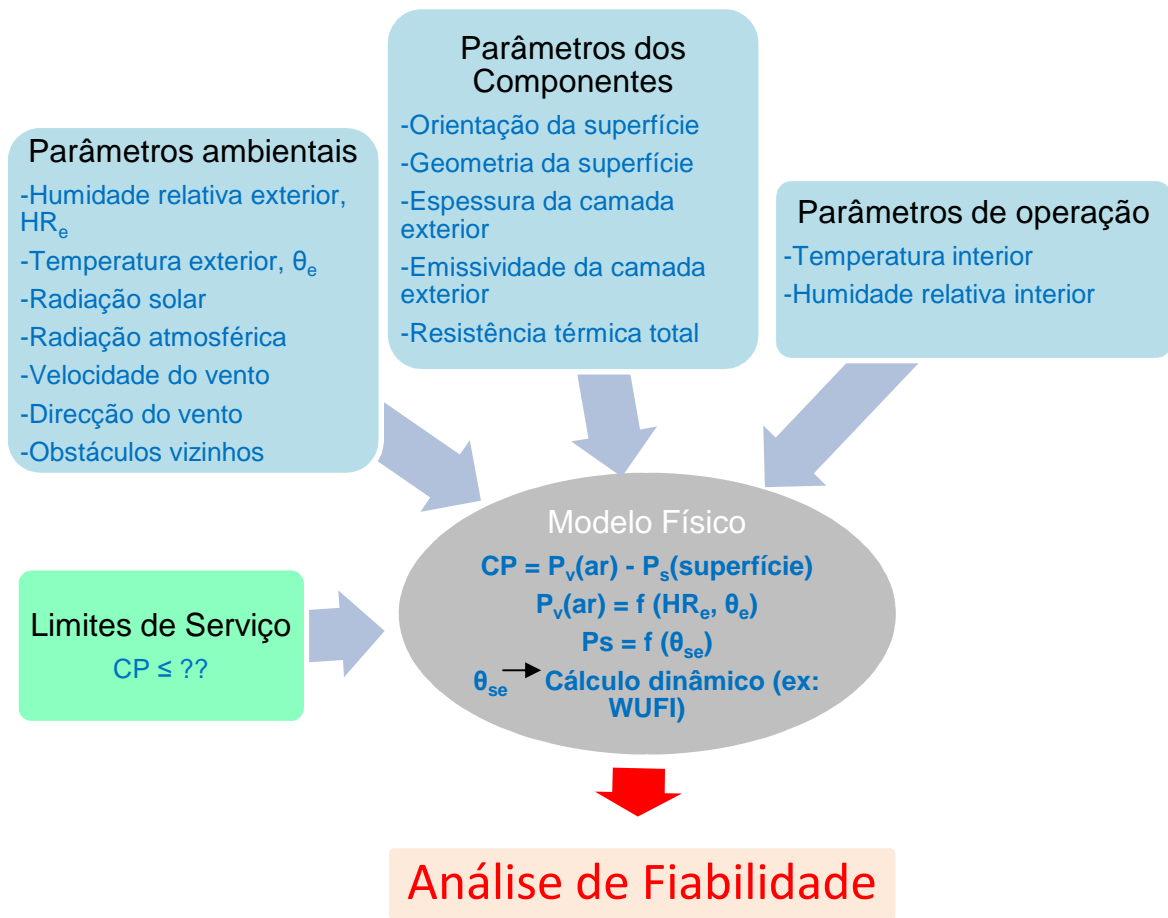


Fig. 4.12 – Modelo solicitação-resistência aplicado à análise de risco da ocorrência de condensações superficiais exteriores [23]

Este modelo solicitação-resistência é relativamente simples comparativamente ao fenómeno que trata. São evidentes as dificuldades existentes para a adopção de um critério que tenha em consideração o crescimento e desenvolvimento de microrganismos.

Outra abordagem poderia ser considerada para a análise de risco, tendo em consideração um factor importante que não foi referido na explicação do modelo solicitação-resistência. Esse factor é o **tempo**. O tempo de exposição é fundamental para avaliar o risco de desenvolvimento de microrganismos. Por conseguinte, o modelo solicitação-resistência torna-se limitado para ter em conta este factor. O modelo dose-resposta, abordado no capítulo 3, seria uma melhor solução para analisar o risco de desenvolvimento de microrganismos.

Futuros trabalhos poderão esclarecer as dificuldades inerentes à aplicação da análise de risco relativamente ao crescimento e desenvolvimento de microrganismos, nomeadamente, a questão relativa à aceitação ou não do risco de um dado valor de CP acarretar o aparecimento de microrganismos.



## 5

**APLICAÇÕES DO MODELO DOSE-RESPOSTA****5.1. ENQUADRAMENTO**

As exigências de durabilidade dos edifícios e da qualidade do ar interior estão em crescimento. Por esse motivo, a modelação higrotérmica dos edifícios está a evoluir para a inclusão da análise de risco. Um dos principais acontecimentos indesejáveis é o crescimento de bolor e a subsequente má qualidade do ar interior [24].

Este capítulo irá concentrar-se na questão da modelação do crescimento de bolor e na aplicação da análise de risco para este caso. O modelo dose-resposta é um modelo de análise de risco e o crescimento de bolor é um problema que, claramente, o seu desenvolvimento depende do tempo de exposição e, por conseguinte, este modelo é adequado para estudar este fenómeno.

**5.2. DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS EM SUPERFÍCIES INTERIORES****5.2.1. CONDIÇÕES DE CRESCIMENTO DE FUNGOS**

A palavra bolor é um termo comum referente ao fungo que pode crescer nos materiais de construção em casas ou outros edifícios. Em consequência desta patologia, as superfícies ficam danificadas e odores são libertados afectando assim a saúde dos utilizadores. Alguns tipos de bolor podem ser potencialmente perigosos, logo é importante fazer uma avaliação correcta da presença de bolor. O visível crescimento de bolor dentro de uma casa nunca é aceitável. No entanto, a literatura científica e médica contem diferentes opiniões acerca do potencial impacto na saúde que a exposição ao bolor traz [25].

Percebe-se que o impacto do bolor na saúde é uma questão subjectiva em que não se encontram respostas concretas. É um assunto que deverá ser desenvolvido em futuras investigações. Interessa neste capítulo abordar algo que está a montante disto. A probabilidade da presença de bolor num elemento de construção leva à necessidade de conhecer modelos que traduzem o crescimento de bolor.

Antes de abordar a modelação, interessa perceber o processo de germinação e crescimento de fungos em elementos de construção. Vários autores têm estudado este assunto, citando-se como exemplo Hunter (1991), Adan (1994) e Sedlbauer (2001). O ciclo de vida de uma colónia de fungos pode ser dividido em três fases: a germinação dos esporos, o crescimento do micélio e a produção dos esporos [26].

No caso das condições ambiente serem óptimas, pode descrever-se o crescimento de fungos a partir de 6 fases sucessivas [27]:

- A para B: Crescimento inicial
- B para C: Fase de aceleração
- C para D: Crescimento contínuo
- D para E: Fase de abrandamento
- E para F: Fase estacionária
- F para G: Fase de declínio do crescimento

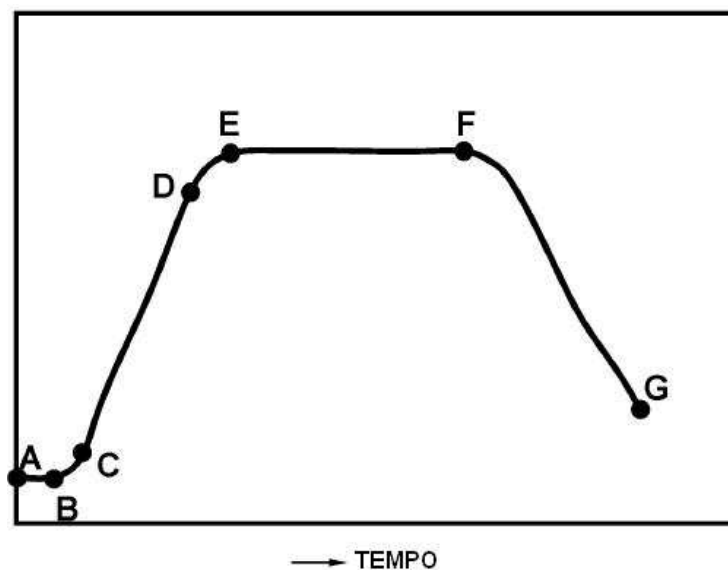


Fig. 5.1 – Diagrama esquemático da curva de crescimento de fungos [27]

Os parâmetros que influenciam directamente o metabolismo dos fungos são [27]:

### **Temperatura**

Uma vez que a multiplicidade das transformações bioquímicas estão envolvidas no crescimento e desenvolvimento de processos de um organismo, é de esperar uma dependência da temperatura em relação ao crescimento e desenvolvimento de microrganismos.

Como se sabe da micologia, os fungos crescem a partir dos 0°C até a uma temperatura óptima de crescimento superior a 30°C. De acordo com alguma literatura, pode concluir-se que os fungos têm capacidade de crescimento dentro de uma gama de temperaturas de 0°C a 50°C.

Visto que as temperaturas dentro de edifícios situam-se, normalmente, entre 0°C e 30°C, conclui-se que a temperatura nunca terá um efeito letal no crescimento e desenvolvimento de fungos (bolor).

### **Humidade**

O critério decisivo para o crescimento de microrganismo é a humidade disponível para os fungos, a qual pode ser retirada pelos fungos não só pelo substrato, mas também do ar, tanto em forma de água

como de vapor de água. Este teor de humidade é descrito, frequentemente, na biologia como a actividade da água – valor de  $a_w$  – e está directamente relacionada com a humidade relativa no material do edifício ou na superfície:

$$HR = a_w \cdot 100 \quad (5.1)$$

em que:

- HR – Humidade Relativa [%];
- $a_w$  – Actividade da água [-].

### ***Quantidade de nutrientes no substrato***

Além da humidade e da temperatura, a presença de nutrientes no substrato onde os fungos crescem, é o factor mais importante para a formação de fungos. No entanto, nos edifícios existe pouca quantidade de nutrientes disponíveis para os fungos.

### ***Valor do pH***

Para a avaliação do crescimento de fungos, o pH é outro pré-requisito a ter em conta. Apesar do intervalo óptimo para o crescimento de fungos se situar entre 5 e 7, valores de pH entre 2 e 11 são tolerados para vários tipos de fungos.

### ***Quantidade de sais no substrato***

A quantidade de sais no substrato tem, possivelmente, um efeito no crescimento microbiológico. No entanto, não existem dados disponíveis na literatura existente.

### ***Luminosidade***

Os fungos não precisam de luz para crescer. Isto pode ser provado pelo facto dos fungos crescerem, igualmente, dentro dos componentes opacos de edifícios. Portanto, não é necessário considerar este factor como uma condição necessária para o crescimento de fungos.

### ***Teor de oxigénio***

O teor de oxigénio deve situar-se pelo menos entre 0,14 e 0,25%. Estas concentrações existem em todos os edifícios. Abaixo destes valores, alguns dos fungos aeróbios podem mesmo alterar a fermentação. Considerar um suficiente teor de oxigénio como uma condição de crescimento de fungos é, portanto, um dado adquirido.

### Rugosidade da superfície

O crescimento de fungos ocorre, frequentemente, em zonas onde depósitos de lixo existem em quantidade significativa. Isto é frequente em superfícies com elevada rugosidade ou em zonas de difícil acesso tais como cantos e arestas. No entanto, o crescimento de fungos já se verificou, igualmente, em superfícies planas. Portanto, é normal não considerar a rugosidade da superfície como uma condição para o crescimento de fungos.

Para além dos parâmetros que influenciam directamente o metabolismo dos fungos citados anteriormente, existe outro factor com muita importância. Com o pressuposto de existirem as condições óptimas para o crescimento de fungos, apenas três parâmetros são necessários ter em conta – quantidade de nutrientes no substrato, temperatura e humidade. Estes parâmetros têm de existir, simultaneamente, para um certo período de tempo. Esta é a razão que justifica a importância do **tempo** no crescimento e desenvolvimento de fungos. A figura que se segue demonstra isso.

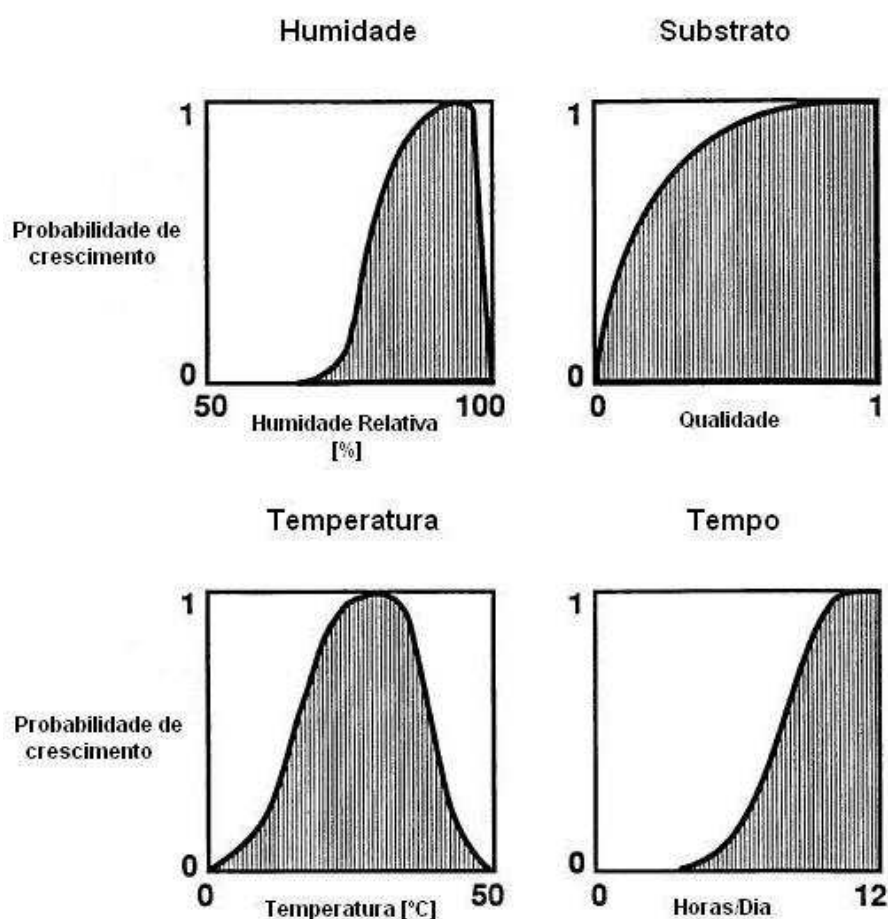


Fig. 5.2 – Vista esquemática dos principais parâmetros que afectam o crescimento de fungos – humidade, temperatura, substrato e tempo [28].

A investigação realizada por vários autores permite concluir que, para elementos de construção, a maior parte dos parâmetros mencionados encontram-se numa gama de valores estudados.

No entanto, existe um parâmetro em que tais conclusões não se podem retirar: a humidade. De entre várias abordagens possíveis para a modelação do crescimento de fungos, aquela que será alvo deste trabalho é a definição dos parâmetros que definem a humidade. Isto implica a imposição de certas hipóteses relativas ao conhecimento dos parâmetros listados acima, os quais não serão alvo de análise.

### 5.2.2. MODELOS DE PREVISÃO PARA O CRESCIMENTO DE FUNGOS

No intuito de avaliar a adequação de alguns modelos existentes para a previsão do crescimento de fungos, interessa apresentar alguns desses modelos. Entre vários modelos serão apresentados os seguintes:

- Modelo TOW (*Time Of Wetness*);
- Modelo VTT (*Technical Research Centre*);
- Modelo Biohigrotérmico (WUFI Bio).

Adan [29] descreve as três fases iniciais do crescimento de fungos (crescimento inicial, fase de aceleração e crescimento contínuo). Para estas, os resultados medidos do crescimento de fungos são descritos matematicamente. Em primeiro lugar, a influência das condições estacionárias é definida. Para poder avaliar o andamento da humidade de curta duração nos componentes dos edifícios no que diz respeito à formação de fungos, é sugerida uma avaliação que se baseia no *time of wetness*. Para a análise do desenvolvimento de fungos num regime variável de temperatura e humidade, Adan apoia-se na definição do quociente entre o período de tempo correspondente a uma humidade relativa da superfície superior a 80 % e o tempo total de duração do ciclo considerado, *TOW (time of wetness)* [27].

O pressuposto aqui presente é que o crescimento de fungos ocorre, embora com um atraso, se um certo valor limite é excedido. Este valor limite é indicado em horas por dia com uma humidade relativa superior a 80%, por exemplo [27].

A indicação do crescimento de fungos, dependente de TOW, é baseada em dados medidos e, portanto, não pode ser usada para a previsão de crescimento de fungos em dependência com o andamento da humidade e temperatura. Além disso, não é possível auferir quaisquer razões físicas no comportamento dos fungos em dependência de TOW a partir deste modelo. Isto tem especial aplicação aquando de pequenos efeitos ocorridos devido a alterações rápidas da humidade relativa [27].

O modelo descrito por Viitanen, Ritschkoff e Hukka para a descrição do crescimento de fungos é baseado em testes laboratoriais em amostras. Este modelo foi desenvolvido especialmente para a madeira e está a ser alargado para outros materiais de construção. Para avaliar o crescimento de fungos, Viitanen introduz um novo termo, o *mold index*, através do qual o crescimento de fungos divide-se em 7 classes [24].

Este modelo funciona bem para condições higrotérmicas estacionárias. Para estimar a influência através das condições climáticas de curta duração – acima de todos os intervalos de secagem – no crescimento de fungos, uma fórmula aproximada é estabelecida. No entanto, não há qualquer modelo físico aplicado neste caso [24].

A disponibilidade de humidade pode ser a única forma de limitar o desenvolvimento de fungos, se se excluir a utilização de fungicidas. Os limites para este factor devem ser correlacionados com os limites da temperatura, de acordo com cada espécie de fungo e com a disponibilidade de nutrientes. A representação de curvas de igual regime de desenvolvimento em função da temperatura e humidade relativa, designadas por isopletas, permite visualizar estas relações. Na Fig.5.3 apresenta-se um exemplo desta representação [26].

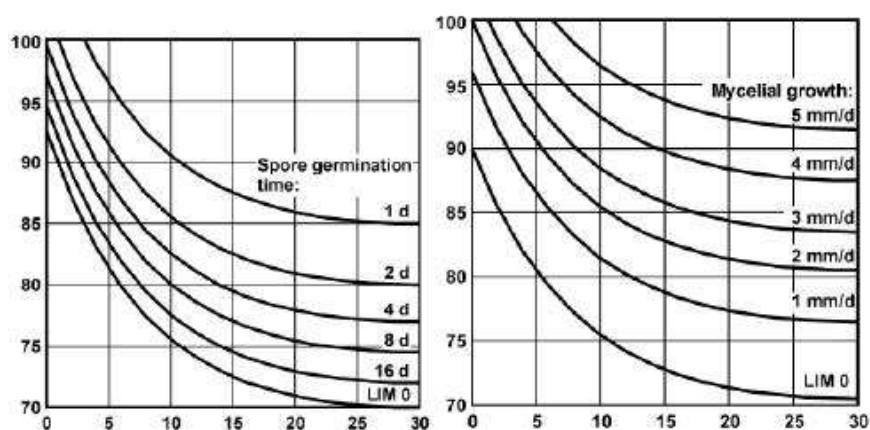


Fig. 5.3 – Isopletas generalizadas de germinação de esporos e crescimento do micélio, para diferentes espécies de fungos, de acordo com a temperatura (em abcissa) e a humidade relativa (em ordenada) [26]

Estas curvas são determinadas sob condições em estado estacionário (humidade relativa e temperatura constantes). No entanto, as temperaturas e humidades relativas que se encontram em edifícios são, normalmente, não estacionárias. Por este motivo, é necessário considerar a variação das condições climáticas [28].

A condição decisiva para a germinação dos esporos é a humidade ambiente que determina o teor de humidade dentro de um esporo. O objectivo do modelo biohigrotérmico é prever o balanço de humidade em dependência com as condições não estacionárias que se encontram nos edifícios, com o intuito de permitir a previsão da probabilidade de crescimento de fungos [28].

Obviamente, o teor de humidade de um esporo é determinado também através de processos biológicos, mas o conhecimento actual está longe de permitir a modelação destes processos. É seguro assumir que acima de um certo teor de humidade mínimo o esporo começa a germinar e nenhum processo biológico ocorre antes disso [28].

Devido ao pequeno tamanho do esporo um modelo isotérmico é suficiente. Assim, os processos de transporte líquido (como a sucção por capilaridade) podem ser agrupados aos processos de transporte por difusão. Debaixo destes pressupostos, são precisas, unicamente, a função de armazenamento de humidade de um esporo e a resistência à difusão do vapor de água dependente da humidade. Estes serão os parâmetros dos componentes necessários com vista ao cálculo do balanço de humidade de um esporo [28].



Em suma, o modelo biohigrotérmico permite ter em conta a alteração das temperaturas superficiais e da humidade relativa para a previsão do crescimento de fungos. No entanto, é necessária mais investigação no que diz respeito às propriedades higrotérmicas dos materiais.

Depois da apresentação de alguns dos modelos existentes para a análise do crescimento de fungos, é necessário associar a análise de risco a estes modelos físico-matemáticos. Como ficou claro na explicação dos modelos, o parâmetro fundamental que determina o crescimento, ou não, de fungos é a **humidade relativa**. No entanto, este parâmetro é um parâmetro derivado.

Devido à complexidade evidente desta patologia, diferentes abordagens podem ser seguidas para ter em conta a análise de risco. A abordagem que segue este trabalho, passa pelo conhecimento dos parâmetros que estão associados à humidade relativa a partir dos quais será estudada a sua natureza estocástica. O modelo dose-resposta, exposto no capítulo 3, será o modelo de base para a análise de fiabilidade.

### 5.3. MODELAÇÃO DO PROBLEMA

Visto existirem diferentes modelos para a previsão do crescimento de fungos, é necessário, em primeiro lugar, escolher um dos modelos para desenvolver a sua modelação. Dos três modelos apresentados, aquele que será a base de análise é o modelo VTT (*Technical Research Centre*).

A modelação matemática para o crescimento do bolor tem sido alvo de investigação na Finlândia há vários anos. Esta investigação tem incluído vários estudos experimentais com as condições para o crescimento de bolor em madeira, mas também em outros materiais de construção. Os dados experimentais têm sido usados para criar um modelo matemático para o crescimento de bolor. O Modelo VTT consiste num modelo matemático que tem em conta o atraso da taxa de crescimento de bolor devido às condições desfavoráveis [24].

Este modelo também tem em conta no seu cálculo as flutuações das condições de humidade. A equação (5.2) calcula o *mold index* ( $M$ ) em função dos seguintes parâmetros [24]:

- Tempo ( $t$ , em semanas);
- Temperatura ( $T$ );
- Humidade relativa ( $HR$ );
- Espécie de madeira ( $W$ );
- Qualidade da superfície a partir do processo de secagem ( $SQ$ ).

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln HR + 0,14W - 0,33SQ + 66,02)} k_1 k_2 \quad (5.2)$$

Nota:  $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes que expressam o atraso do crescimento nas fases inicial e tardia, respetivamente.

A partir desta equação é possível construir um quadro com as várias classes do *mold index*:

Quadro 5.1 – Índice do crescimento de bolor para as experiências e modelação [24]

Index	Taxa de crescimento	Descrição
0	Não há crescimento	Esporos não activados
1	Pequenas quantidades de bolor na superfície (microscópico)	Fases iniciais de crescimento
2	<10% de cobertura de bolor na superfície (microscópico)	Fases iniciais de crescimento
3	10-30% de cobertura de bolor na superfície (visual)	Produção de novos esporos
4	30-70% de cobertura de bolor na superfície (visual)	Crescimento moderado
5	>70% de cobertura de bolor na superfície (visual)	Abundante Crescimento
6	Cerca de 100% de cobertura de bolor	Forte Crescimento

Neste momento, o modelo prevê unicamente o crescimento de bolor em madeira. No entanto, está a ser desenvolvido um modelo com a colaboração do VTT e do TUT (*Tampere University of Technology*) onde o principal objectivo é formular uma aplicação mais diversificada do modelo VTT existente para o crescimento de bolor. Alguns dos aspectos de progresso são [24]:

1. Desenvolver a fiabilidade dos modelos matemáticos existentes fazendo variar as condições de temperatura e humidade;
2. Aumentar o número de materiais disponíveis para o modelo;
3. Testar o emprego do modelo, em laboratório e em campo, executando experiências onde sejam incluídos os efeitos das camadas adjacentes nos materiais de construção.

A partir destes aspectos é possível ter uma definição mais genérica do *mold index* e a sua respectiva utilização. O *mold index* é o número que define o grau de colonização de fungos que um determinado material apresenta. A partir desta definição, e do modelo apresentado, é possível apresentar graficamente a evolução do *mold index* ao longo do tempo (Fig.5.4).

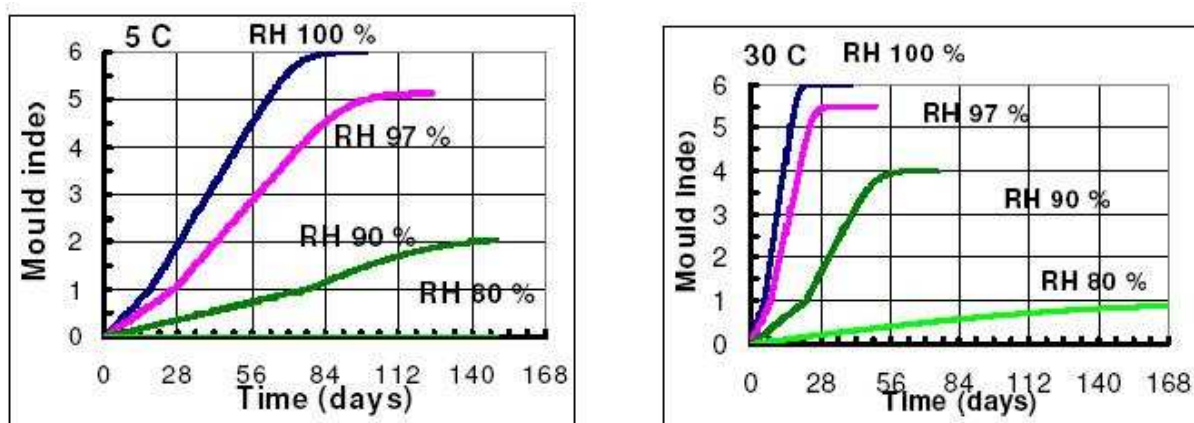


Fig. 5.4 – Evolução do *mold index* ao longo do tempo para diferentes condições higrotérmicas [24]

Estes futuros progressos, relativos ao modelo VTT, acabam por ser o princípio da abordagem para uma possível análise de risco de desenvolvimento de fungos em superfícies interiores com o apoio do modelo dose-resposta.

Observando a Fig.5.4, verifica-se que o andamento das curvas, que representam a evolução do *mold index* ao longo do tempo, depende principalmente da temperatura e da humidade relativa. Assim, recorrendo ao modelo dose-resposta pode estabelecer-se como a dose de solicitação um conjunto de valores da temperatura e da humidade relativa (clima + condições de utilização). O *mold index* é a resposta para uma determinada dose de solicitação constituída pelos dois parâmetros citados.

O raciocínio a ter em consideração é saber qual o risco de um determinado material de construção, quando sujeito a uma dada dose de solicitação, apresentar um certo valor para o *mold index*.

No entanto, é necessário frisar que as curvas representadas na Fig. 5.4 referem-se a situações estacionárias. Estas curvas traduzem estudos laboratoriais onde cada provete com fungos foi submetido a uma humidade relativa constante durante um certo período de tempo. Cada curva representa a variação do *mold index* para uma humidade relativa e temperatura constantes.

Se em cada um destes provetes as condições higrométricas se modificarem durante um intervalo de tempo, resultarão curvas que representam uma dose global (combinação de diferentes doses) para um dado local. Esta dose global será diferente de local para local de acordo com a variabilidade dos parâmetros que definem a dose. Ou seja, conhecendo as temperaturas ideais para o crescimento de fungos, o parâmetro que influenciará significativamente a variabilidade da dose global é a humidade relativa.

Para uma melhor compreensão, é apresentado o seguinte esquema:

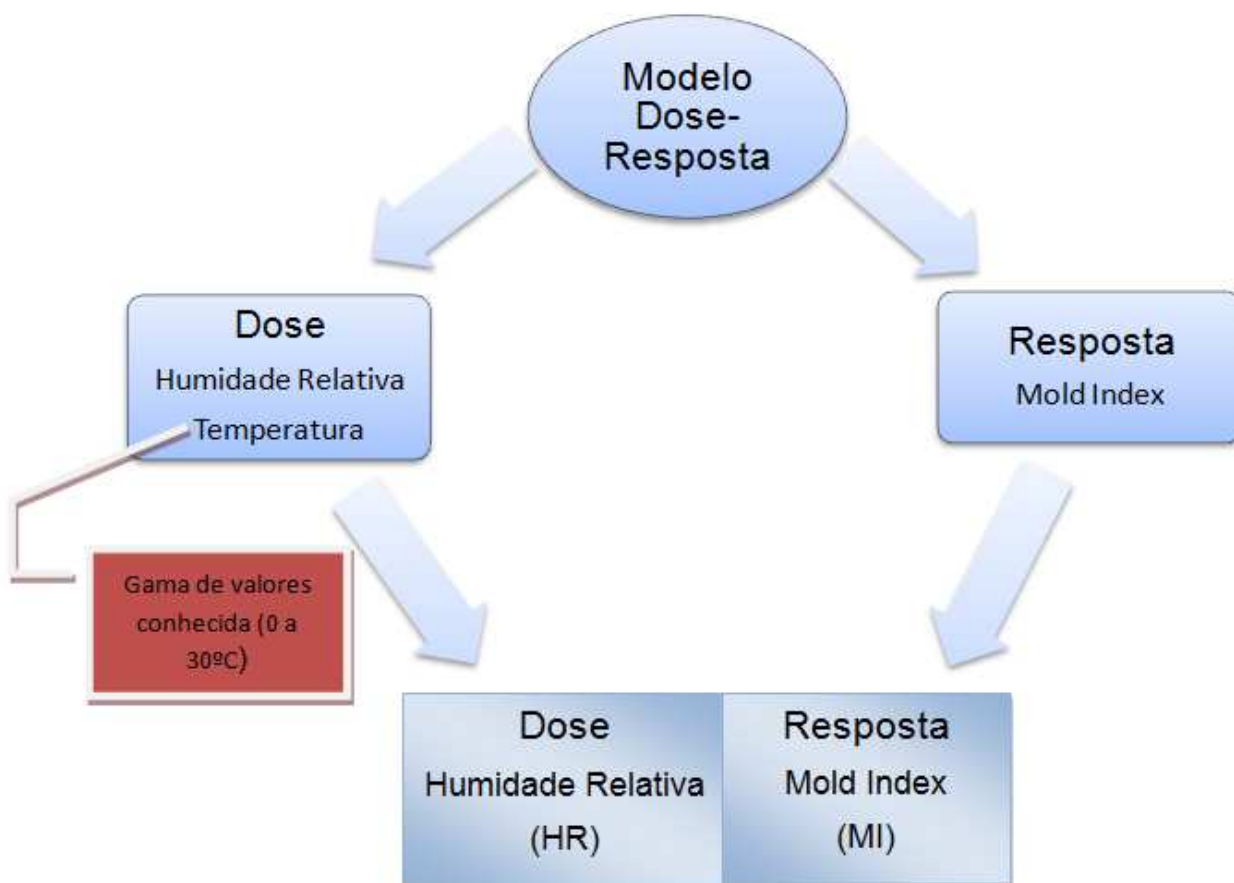


Fig. 5.5 – Aplicação do modelo dose-resposta na modelação relativa ao crescimento de fungos a partir do modelo VTT

A abordagem para a modelação de risco em discussão, tem que ter em consideração os parâmetros que definem a humidade relativa. Assim, conhecendo a dose global de solicitação constituída pelos vários parâmetros que definem a humidade relativa, é possível obter uma panóplia de respostas, ou seja, diferentes valores para a *mold index*.

Os parâmetros que definem a humidade relativa são:

- Temperatura interior;
- Produção de vapor;
- Ventilação;
- Humidade absoluta exterior.

A variabilidade que os valores destes parâmetros apresentam é significativa. A sua natureza estocástica será debatida no capítulo 6. Neste ponto interessa, principalmente, perceber como é que a partir do conhecimento destes parâmetros que definem a humidade relativa, é possível obter a resposta representada pelo *mold index*. A Fig 5.6 aborda este problema.

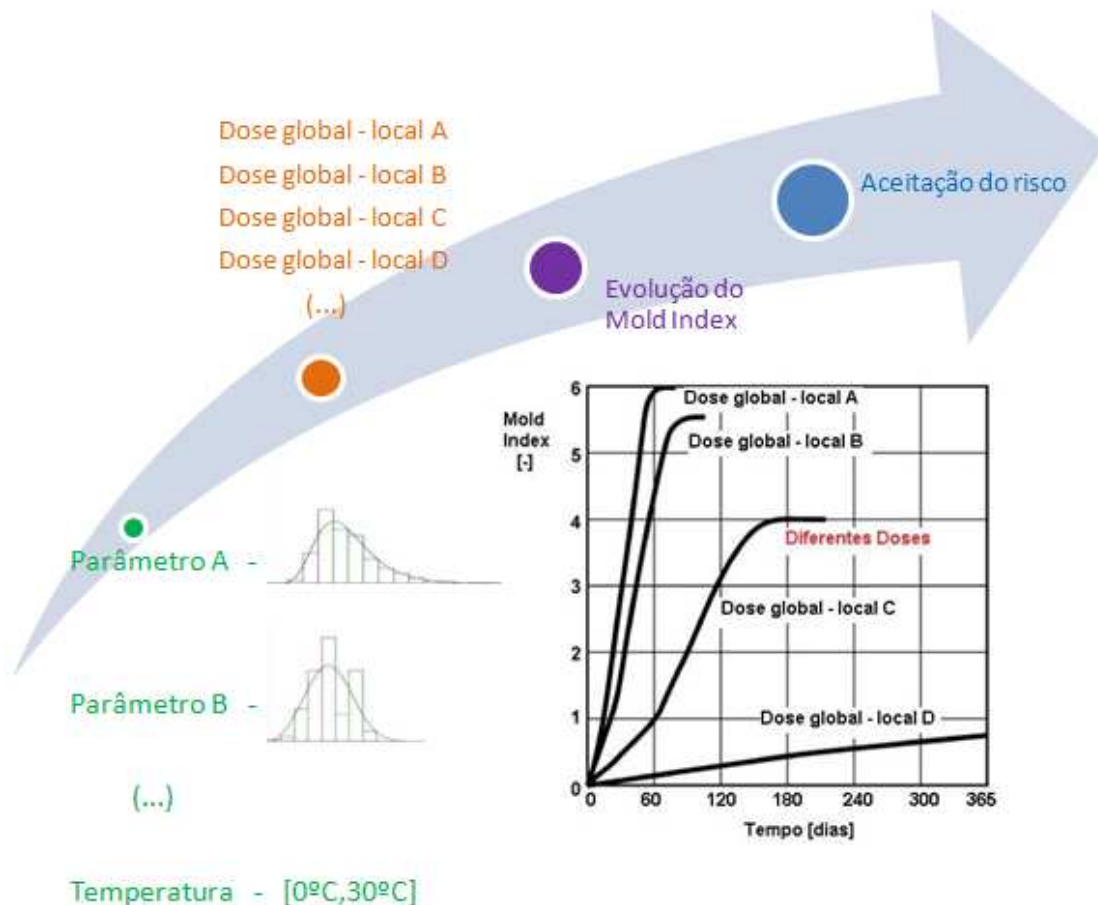


Fig.5.6 – Possível abordagem para a modelação do risco de crescimento de fungos

A Fig. 5.6 traduz uma possível abordagem à modelação do risco de crescimento de fungos em superfícies interiores. Aplicando o modelo dose-resposta, consegue definir-se como a dose solicitação dois importantes parâmetros:

- **Humidade Relativa** – definida através dos seus parâmetros que a caracterizam (definidos genericamente como: parâmetro A, parâmetro B, etc);
- **Temperatura** – cujo intervalo de valores ideal para o desenvolvimento de fungos é conhecido.

Assim, admitindo que a variabilidade do parâmetro **Temperatura** é conhecida, falta saber qual a variabilidade dos parâmetros que caracterizam a Humidade Relativa. Cada um dos parâmetros que caracterizam a humidade relativa apresenta uma grande variabilidade. Esta variabilidade pode ser estudada para assim ser definida por uma curva de distribuição. O conhecimento da curva de distribui-

ção de cada um destes parâmetros, permitirá, conjuntamente com as diferentes temperaturas, formar várias doses. A partir da constituição das diferentes doses é possível, através da representação gráfica, desenhar o andamento de cada curva (que representa a dose global) em função do tempo. Assim, cada curva representará o andamento da dose global (combinação das diferentes doses) para um determinado local.

A partir do conhecimento da variação anual da humidade relativa num determinado local será possível conhecer o andamento da curva que representa essa dose global.

Depois de representar a dose global para cada local, no gráfico do *mold index* e conhecendo as 7 classes possíveis para definir o *mold index* (Quadro 5.1), será possível avaliar o risco do crescimento de fungos.

Esta abordagem tem algumas limitações relativas ao conhecimento das curvas de distribuição que caracterizam os parâmetros com uma grande variabilidade. Serão necessários futuros trabalhos com o intuito de conhecer melhor as propriedades dos materiais para conseguir definir-se cada uma destas curvas.

# 6

## COMPORTAMENTO ESTOCÁSTICO DOS PARÂMETROS

### 6.1. ENQUADRAMENTO

Após a análise dos modelos de análise de risco propostos para os diferentes acontecimentos indesejáveis (condensações superficiais interiores, condensações internas, condensações superficiais exteriores e desenvolvimento de fungos em superfícies interiores), interessa perceber qual a natureza dos parâmetros (variáveis) que condicionam cada acontecimento indesejável.

A variabilidade dos parâmetros que integram uma análise higrotérmica já foi mencionada, pelo que, neste momento, é necessário perceber a natureza estocástica desses parâmetros. A partir desta análise, poderá ser possível saber se estes podem ser considerados como parâmetros determinísticos ou aleatórios nos modelos de análise de risco estudados. No entanto, devido à falta de informação acerca da variabilidade dos parâmetros, haverá alguns em que esta análise será menos extensa.

Antes da definição dos parâmetros envolvidos nos acontecimentos indesejáveis estudados, é interessante perceber a aplicabilidade destes três grandes conjuntos de parâmetros. Para isso, incidindo este aspecto no fenómeno das condensações internas, todos estes parâmetros (ambientais, dos componentes e de operação) terão de ser fornecidos ao programa Condensa 13788 para que este faça a sua análise. Na figura que se segue, apresenta-se a página principal do programa Condensa 13788 onde verificamos os locais para o preenchimento dos principais parâmetros.

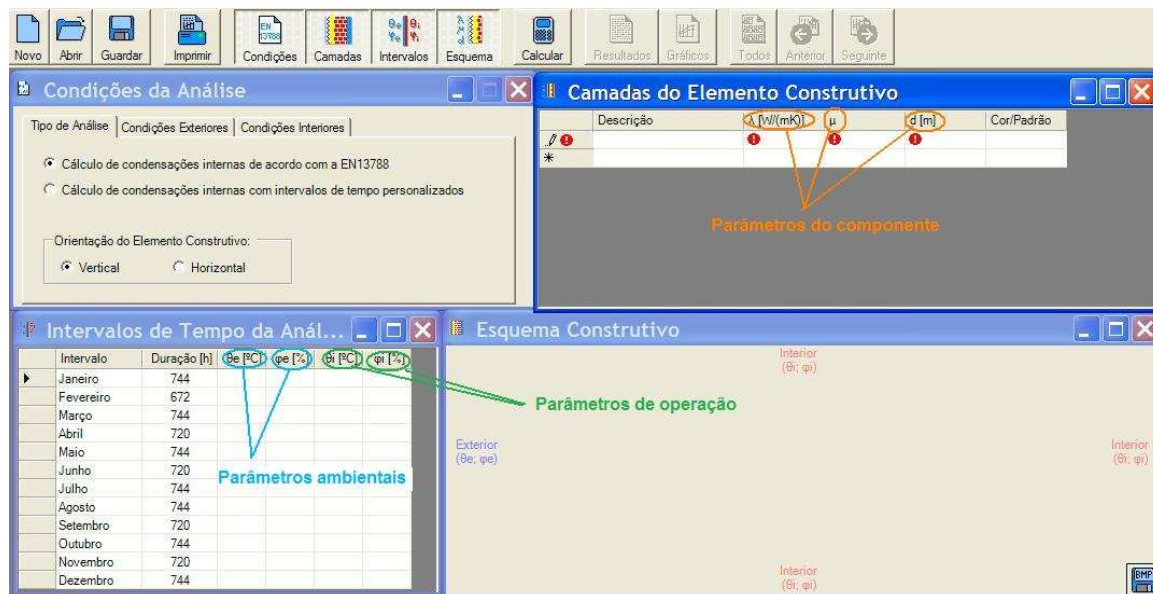


Fig. 6.1 – Página principal do Programa Condensa 13788: introdução dos diferentes parâmetros

A organização do presente capítulo será feita da seguinte forma:

- Variabilidade dos parâmetros ambientais;
  - ✓ Relações entre parâmetros
  - ✓ Gama de valores possíveis
  - ✓ Apresentação da análise de sensibilidade para um acontecimento indesejável: condensações superficiais exteriores
- Variabilidade dos parâmetros dos componentes;
  - ✓ Como calcular os parâmetros – normalização
  - ✓ Gama de valores possíveis
- Variabilidade dos parâmetros de operação
  - ✓ Gama de valores possíveis

Relativamente à análise de sensibilidade estudada para as condições superficiais exteriores, será apresentado o resultado do estudo realizado no LFC-FEUP [23] onde foi realizada uma análise de sensibilidade aos parâmetros envolvidos. Embora a finalidade do presente trabalho não seja realizar uma análise de sensibilidade a todos os parâmetros em estudo, pois seria necessário mais tempo para a sua execução, vai ser exposto para este acontecimento indesejável o resultado desta análise. Os resultados apresentados são relativos à variabilidade dos parâmetros ambientais pois são aqueles que influenciam significativamente o fenómeno das condensações superficiais exteriores.



## 6.2. PARÂMETROS AMBIENTAIS

De acordo com 3.1, existem diferentes parâmetros ambientais que têm influência no comportamento higratérmico de edifícios. De entre os vários parâmetros citados, destacam-se os seguintes:

- **Humidade relativa exterior;**
- **Temperatura do ar exterior;**
- **Radiação Solar (directa, difusa e reflectida);**
- **Precipitação;**
- **Velocidade do vento;**
- **Direcção do vento;**
- **Vegetação.**

Tem interesse perceber quais as relações que podem existir entre todos estes parâmetros. Para o efeito será apresentado um breve desenvolvimento de um estudo intitulado “Desempenho térmico de edificações e simulação computacional no contexto da arquitectura bioclimática” [30]. O objectivo principal desta exposição será dar uma ideia global dos vários parâmetros ambientais e da complexidade das suas relações.

### 6.2.1. RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS

O clima é caracterizado por *factores* e *elementos*, que podem ser interpretados diferentemente segundo cada autor.

Os *elementos* climáticos são os componentes físicos do clima, especialmente **temperatura, humidade do ar, precipitações**, vento e duração da exposição ao sol, e estes podem variar segundo os diversos *factores*, como a latitude, **radiação solar, direcção do vento**, distância do mar, relevo, **vegetação**, massas de ar e outros.

Consideram-se como dados climáticos importantes para a análise do clima de uma região a temperatura, a humidade, a pluviosidade, os ventos e a radiação solar.

Existe uma relação directa entre a **radiação recebida** e a **temperatura média do ar**; o estado do céu (nebulosidade) determina o andamento diário da temperatura. De facto, as nuvens interceptam o fluxo de radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, modificando o balanço térmico local; com o céu limpo, o solo ganha energia solar e perde energia por irradiação mais do que com céu encoberto. A temperatura do ar numa determinada localidade depende também do ganho de calor devido ao deslocamento de grandes massas oceânicas (correntes) e massas de ar (ventos) e da proximidade de grandes massas de água que atenuam as amplitudes térmicas.

A amplitude térmica média de uma localidade é maior nas zonas caracterizadas por céu limpo do que nas zonas com alta nebulosidade. Também a humidade do ar atenua tanto a radiação absorvida quanto a radiação emitida, e por este motivo as zonas de clima quente e húmido a amplitude térmica diária é baixa.

Os dados de temperatura podem estar disponíveis em diversas formas: valores médios, máximos e mínimos anuais, mensais e diários, distribuição de frequência dos valores diários, das médias diárias, etc.

Para a descrição do lugar interessa ter em atenção outro aspecto importante: a altitude. A altitude em relação ao nível do mar é um dos factores que possui grande influência sobre a temperatura exterior; isto deve-se simplesmente ao facto que aumentando a altitude, o ar é menos carregado de partículas sólidas e líquidas, e são estas que absorvem a radiação solar e a difundem, aumentando a temperatura do ar. Desta forma, a temperatura do ar decresce constantemente à medida que aumenta a altitude na troposfera.

O parâmetro climático básico é a pressão parcial do vapor de água e não a **humidade relativa**, que é um parâmetro derivado. A pressão do vapor permanece normalmente constante durante o dia; a humidade relativa, ao contrário, é ligada a temperatura de bolbo seco, e varia de forma significativa. Os valores mais elevados registam-se durante a madrugada, quando a temperatura do ar atinge seu valor mínimo, e mais baixo no início da tarde. A flutuação diária da humidade relativa é mais sensível no Verão do que no Inverno, de forma análoga à temperatura do ar.

Assim como os outros dados climáticos, o **vento** também apresenta variações diárias e de estação para estação. O vento caracteriza-se através da velocidade, sectores de proveniência e da frequência, que representa a rosa-dos-ventos. O regime dos ventos está ligado directamente à nebulosidade: os ventos fracos acompanham muito frequentemente o céu coberto, os ventos fortes o céu claro.

Quadro 6.1 – Relação do vento com a nebulosidade [30]

Nebulosidade	Velocidade do vento		
	0 a 3	4 a 8	>8
Fraca (0 ou 1 ou 2 octas)	17 %	29 %	54 %
Forte (7 ou 8 octas)	50 %	29 %	21 %

Fonte: CSTB - La conception thermique des batiments a La Reunion

Segundo este estudo [30], Evans e Schiller afirmam que o vento é um componente climático que se relaciona com o desenho dos edifícios, conjuntos de edifícios e assentamentos urbanos. A distribuição da orientação dos ventos é um dado importante, seja para incorporar protecção nos períodos frios, seja para aproveitá-los nos meses quentes com humidade relativa alta.

A **velocidade dos ventos** não é constante, e há uma tendência a aumentar perto do meio-dia, quando os valores da radiação solar atingem os níveis máximos, e produzem turbulência devido a subida do ar quente e descida do ar frio. As velocidades mínimas do vento são nas últimas horas da tarde, quando as coberturas superficiais do ar são mais frias, e reduzem o intercâmbio com as coberturas superiores, que tem velocidades maiores.

Existem três tipos principais de **radiação solar**:

- Directa - radiação proveniente directamente do sol;
- Difusa - radiação da qual uma fracção é interceptada pela atmosfera (nuvens), que a difundem em todas as direcções;
- Reflectida - radiação directa e difusa da qual uma parte é devolvida pelo edifício.

A **pluviosidade** é medida em milímetros; uma pluviosidade anual menor que 500 mm é considerada insuficiente para o crescimento da vegetação. A possibilidade de manter a vegetação depende também da temperatura do ar e da distribuição das chuvas durante o ano. Normalmente as chuvas estão relacionadas com o vento proveniente de certas direcções, dado importante para o projecto.

A relação com a **vegetação** é definida como o aspecto que caracteriza a existência e a densidade da vegetação no sítio do edifício. Quanto maior é a densidade da vegetação presente, menor e mais estável será a temperatura interna do edifício, maior a humidade e a protecção do vento. Se existe obstrução vegetal, o efeito desta dependerá da direcção na qual é colocada; uma casa ou edifício terão a temperatura mais alta no Inverno e mais baixa no Verão se a vegetação protege as fachadas norte, leste e oeste. Também o tipo de vegetação influi no efeito que esta pode ter na construção, porque incide de forma variável na radiação, vento e humidade. Quanto maior é o percentual de plantas semi-verdes, menor será a temperatura, maior a protecção dos ventos no inverno e mais constante a humidade durante o ano.

#### 6.2.2. GAMA DE VALORES POSSÍVEIS

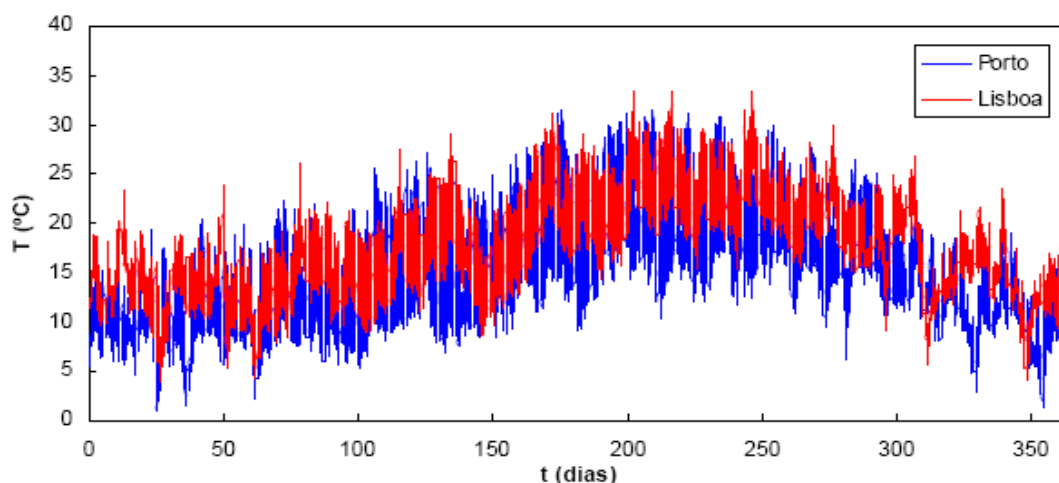
Após uma breve explicação da influência dos principais parâmetros ambientais na envolvente de um edifício, percebe-se que os edifícios devem ser concebidos de acordo com o seu ambiente integrante, exterior e interior. Não será correcto construir da mesma forma em diferentes regiões higrotérmicas. Focando a parte exterior do edifício, este está sujeito a várias solicitações ambientais [31]. No entanto, caracterizar estas solicitações torna-se complicado pois lidamos com variáveis aleatórias.

Dependendo da complexidade que se aborda o problema, alguns destes parâmetros podem não entrar no estudo. Em concreto, quando se analisa os problemas em regime permanente podemos restringir os parâmetros ambientais à humidade relativa exterior e à temperatura do ar exterior.

Em regime variável esta abordagem fica mais complexa. Além de todos os parâmetros ambientais listados serem importantes, a sua própria variação é fundamental. A variação diária das condições climáticas – a variação da temperatura do ar exterior está ilustrada na Fig. 6.2 – usualmente requer períodos de tempo curtos.

Relativamente aos valores possíveis para os parâmetros ambientais, estes podem ser encontrados em diferentes bases de dados a nível mundial. Existem vários tipos de bases de dados a nível mundial, construídas a partir de registos de estações climáticas. A sua construção é realizada por métodos diversos, como seja o caso dos “Test Reference Years” (TRY) na Europa ou os “Typical Meteorological Years” (TMY) e “Weather Years for Energy Calculations” (WYEC) nos Estados Unidos. O método preconizado pela pré norma prEN ISO 15927-4 (CEN, 2005) permite a produção de informação semelhante a essas bases, mas contém maior sofisticação, aproximando-se da definição de “Design Reference Year” proposta por Lund (1991). Em Portugal, foi produzido um Ano Climático de Referência para Lisboa (INMG/LNEC, 1988) [26].

“A utilização de anos climáticos sintéticos, não constituídos por valores realmente medidos, mas gerados com base em métodos estocásticos, pode ser interessante quando, para uma determinada região, não existem anos de referência baseados totalmente em dados medidos. O programa METEONORM (Meteotest, 2003), que se cita como exemplo, inclui este tipo de funcionalidade” [26].



. Fig. 6.2 - Variação anual da temperatura exterior, de Janeiro a Dezembro, de acordo com os dados produzidos pelo METEONORM [26]

No entanto, a partir desta figura não é possível demonstrar a variabilidade das temperaturas de ano para ano. Para ter em conta esta variabilidade, serão apresentados, nas figuras que se seguem, gráficos demonstrativos da enorme variabilidade que os principais parâmetros ambientais podem sofrer. Estes gráficos são provenientes de um estudo realizado no Instituto de Meteorologia [32].

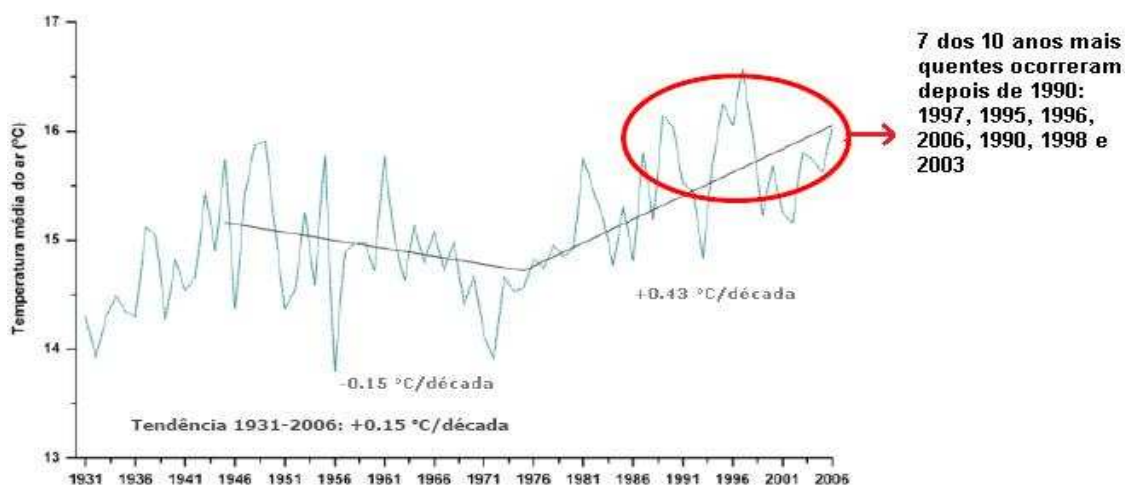


Fig. 6.3 – Temperatura média do ar verificada entre os anos 1931 e 2006 em Portugal Continental

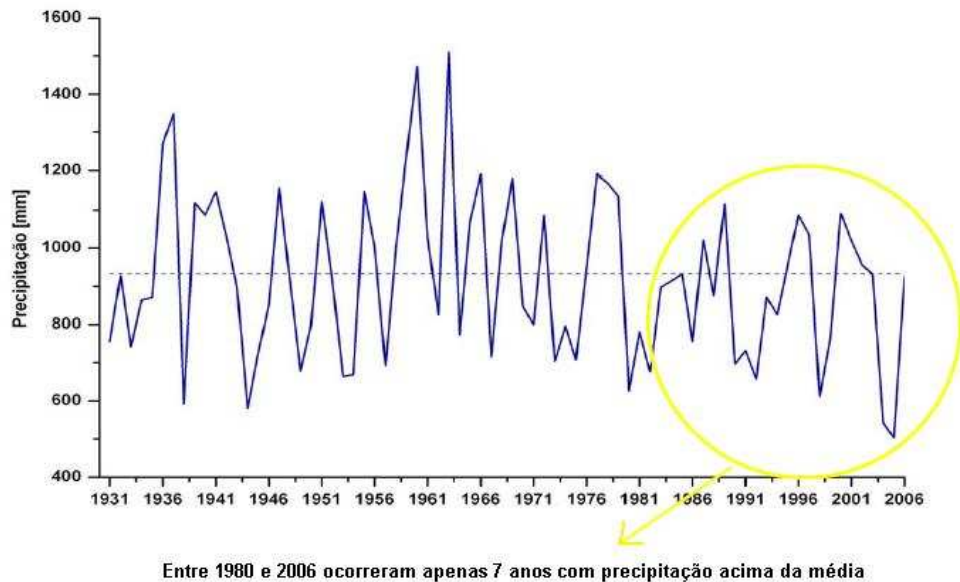


Fig. 6.4 – Precipitação verificada entre os anos 1931 e 2006 em Portugal Continental

Observando as figuras 6.3 e 6.4, é possível observar a significativa variabilidade que os parâmetros ambientais (temperatura do ar e precipitação) apresentam durante um período de tempo relativamente longo. Por outro lado, conclui-se claramente que o uso de valores médios para abordagens mais realistas não é adequado. Outro aspecto importante a reter é o que se passa nos últimos anos. Nota-se claramente uma mudança de trajecto nas curvas que representam o andamento dos valores dos parâmetros citados.

Para um melhor entendimento deste aspecto, apresenta-se a seguinte figura:

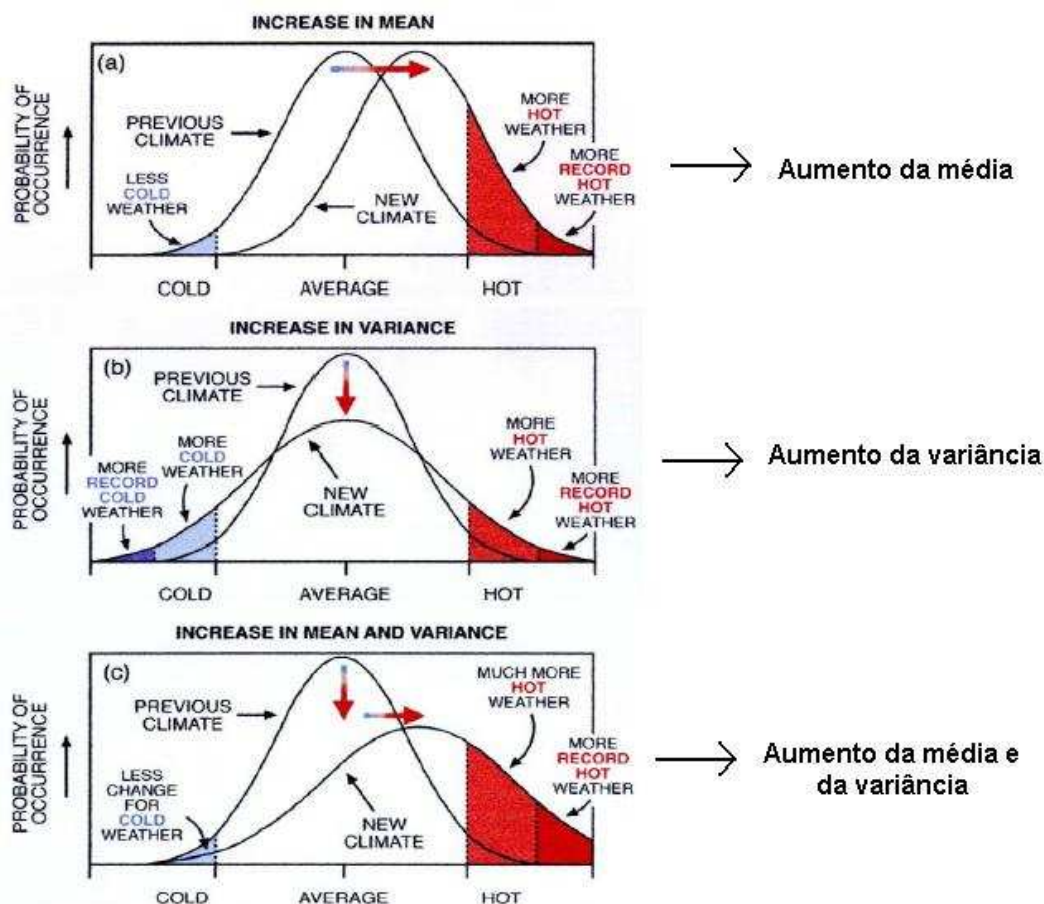


Fig. 6.5 – Variabilidade e alterações climáticas

Observando esta figura, é possível realçar dois aspectos importantes. Por um lado, a definição de uma curva de distribuição para o clima indica, claramente, a grande variabilidade que os parâmetros ambientais apresentam. Esta curva é definida através dos seus parâmetros estatísticos, nomeadamente a sua média e variância. A possibilidade de construir uma curva de distribuição para o clima indica, sobretudo, a importância de considerar uma gama de valores para estudos higrotérmicos e não centrar esses valores num simples valor médio.

Por outro lado, pode dizer-se que as alterações climáticas introduzem, teoricamente, não apenas uma translação nas curvas de distribuição (o que implica, por exemplo, o aumento dos valores máximos), mas também a própria alteração da curva de distribuição. Isto leva à modificação da gama de valores que cada curva engloba, ou seja, as alterações climáticas alteram a própria variabilidade do clima.

Visto isto, é necessário ter em consideração estes efeitos pois são estas considerações que aumentarão a fiabilidade dos modelos de análise de risco adoptados.

Na Noruega existe um programa de investigação “CAB – climate adapted buildings” [33] em que está a ser dado um importante passo rumo a novos métodos e aproximações, para que estas considerações geográficas dependentes do clima sejam linhas de orientação na concepção de edifícios. De igual modo, na Suécia existe um projecto em desenvolvimento, designado “Sustainability of the Swedish

built environment towards climate change” [34], em que os investigadores têm como objectivo avaliar o impacto de possíveis alterações climáticas em edifícios.

Em síntese, estes parâmetros apresentam uma grande variabilidade como é facilmente perceptível. Conclui-se que estes apresentam uma natureza estocástica significativa. Além de diferentes zonas climáticas apresentarem valores para estes parâmetros ambientais completamente distintos, estes também têm uma considerável variação dentro de locais semelhantes.

Estes parâmetros terão de ser considerados como variáveis aleatórias nos modelos de análise de risco estudados. No entanto, para níveis de complexidade baixos, nomeadamente estudos em regime permanente, a avaliação de risco ficará simplificada pelo uso de valores médios.

### 6.2.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE APLICADA A UM ACONTECIMENTO INDESEJÁVEL: CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS EXTERIORES

Em relação ao estudo do LFC-FEUP relativo às condensações superficiais exteriores, os parâmetros ambientais analisados foram os seguintes: temperatura do ar exterior e humidade relativa exterior, a radiação solar, a radiação atmosférica, a velocidade e direcção do vento e a presença de obstáculos na vizinhança. Para estes parâmetros foi realizada uma análise de sensibilidade com os seguintes resultados [23]:

#### Temperatura exterior

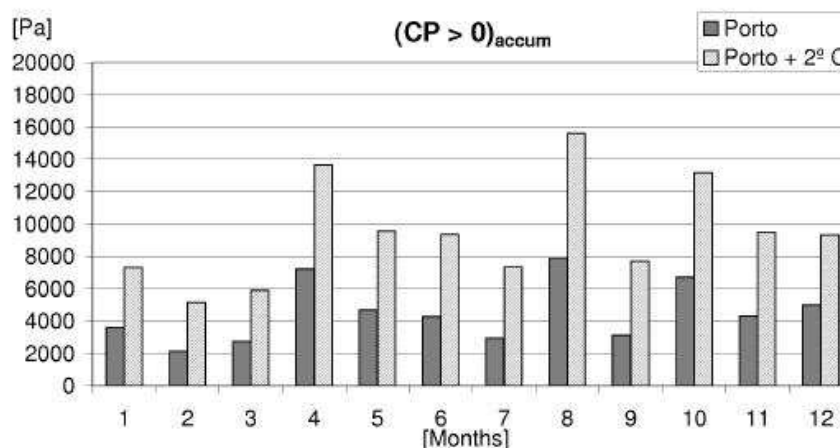


Fig. 6.6 – Variação do valor acumulado de CP com a temperatura exterior (simulação numérica)

Este parâmetro é muito relevante quando se fala em condensação superficial, não só por controlar a pressão parcial de vapor da água no ar perto da superfície, mas também porque influencia a temperatura superficial e, consequentemente, a pressão de saturação de vapor da água junto à superfície. Na análise de sensibilidade a este parâmetro, verificou-se uma grande variação da Condensação Potencial (CP) com a variação da temperatura. Visto esta variação de CP ser significativa, conclui-se que a temperatura exterior deve ser tratada no modelo probabilístico como uma variável aleatória;

### Humidade relativa exterior

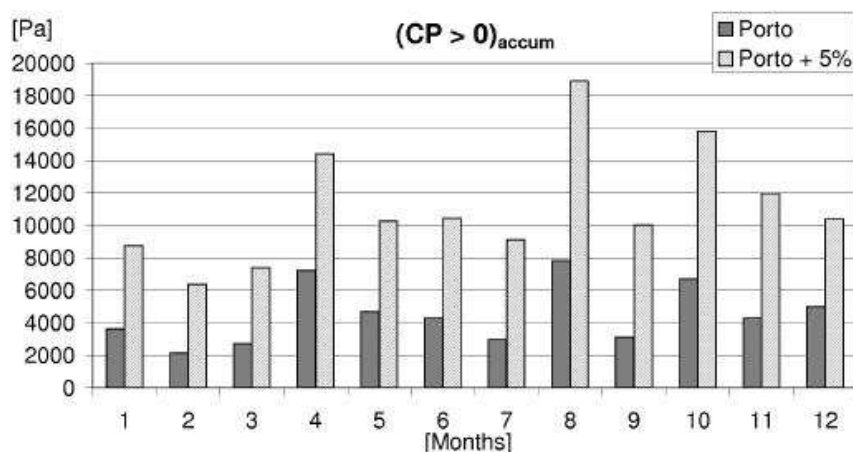


Fig. 6.7 – Variação do valor acumulado de CP com a humidade relativa exterior (simulação numérica)

Este parâmetro influencia, significativamente, a pressão parcial de vapor da água no ar perto da superfície e, por conseguinte, é um parâmetro relevante para o fenómeno e deve ser tratado como uma variável aleatória;

### Radiação solar

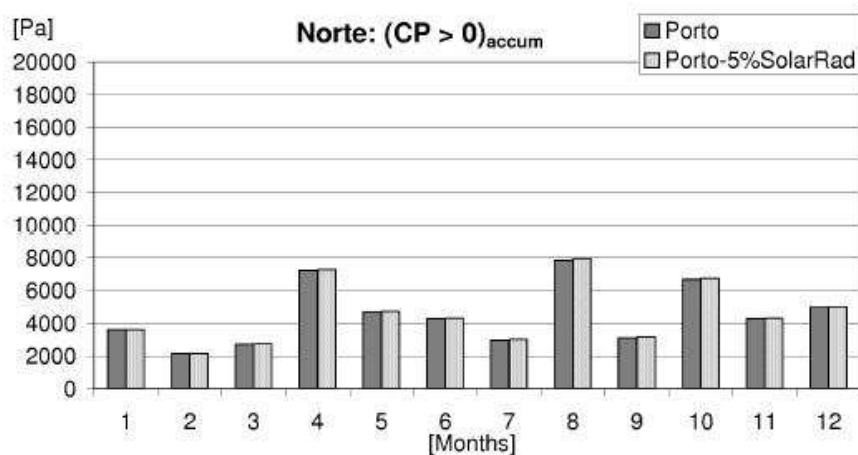


Fig. 6.8 – Variação do valor acumulado de CP com a radiação solar (simulação numérica)

A variação de  $CP$  não é muito relevante quando se analisa a radiação solar global (directa + difusa). A radiação solar afecta, principalmente, a temperatura superficial durante o dia. Devido à pouca inércia térmica já referida, o calor armazenado durante o dia é totalmente perdido poucas horas depois do cair da noite. Logo, durante a noite, a temperatura superficial baixa quase independentemente da radiação solar. Embora a radiação solar tenha pouca influência na condensação superficial, é necessário avaliar o seu efeito na secagem da superfície, onde, provavelmente, terá um maior significado;



### Radiação atmosférica

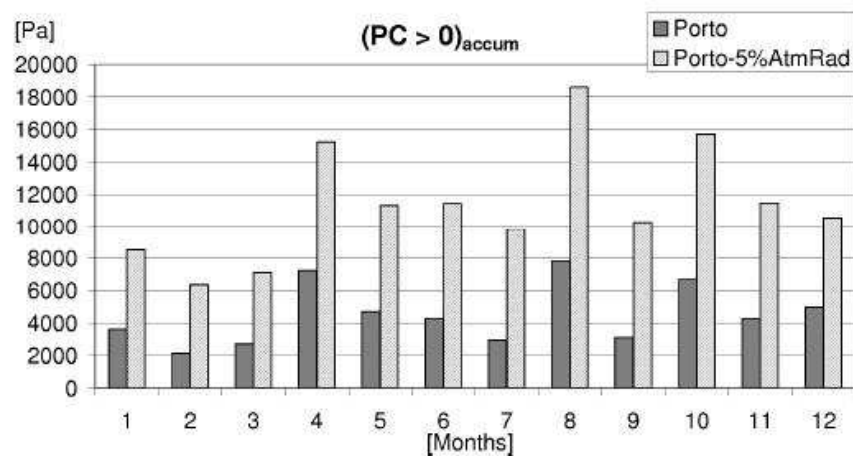


Fig. 6.9 – Variação do valor acumulado de CP com a radiação atmosférica (simulação numérica)

Este é o parâmetro com maior importância relativamente à condensação superficial e, por isso, deverá ser tratado como uma variável aleatória no modelo probabilístico. A justificação para tal, encontra-se no facto de quanto menor for a radiação atmosférica emitida pelo céu, menor será a radiação absorvida pela superfície. Durante a noite, esta diminuição da radiação absorvida aumenta o negativo balanço radiativo na superfície da fachada, o que leva a um abaixamento da temperatura superficial e, consequentemente, aumenta o valor de  $CP$ ;

### Velocidade e direcção do vento

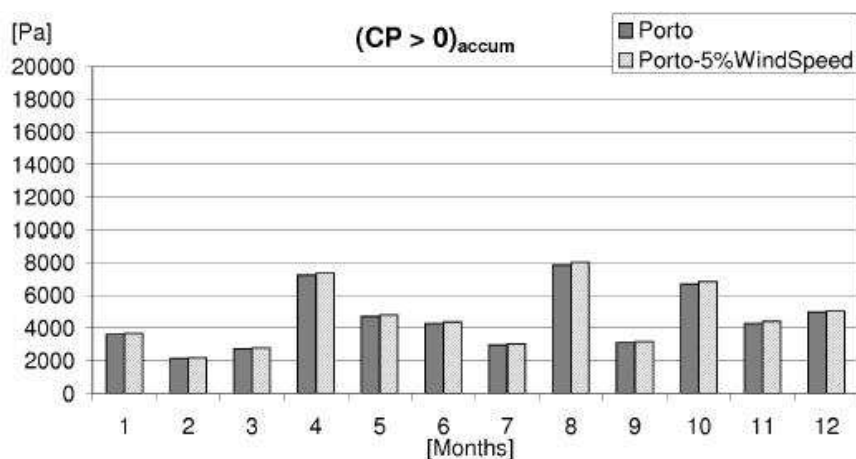


Fig. 6.10 – Variação do valor acumulado de CP com a velocidade do vento (simulação numérica)

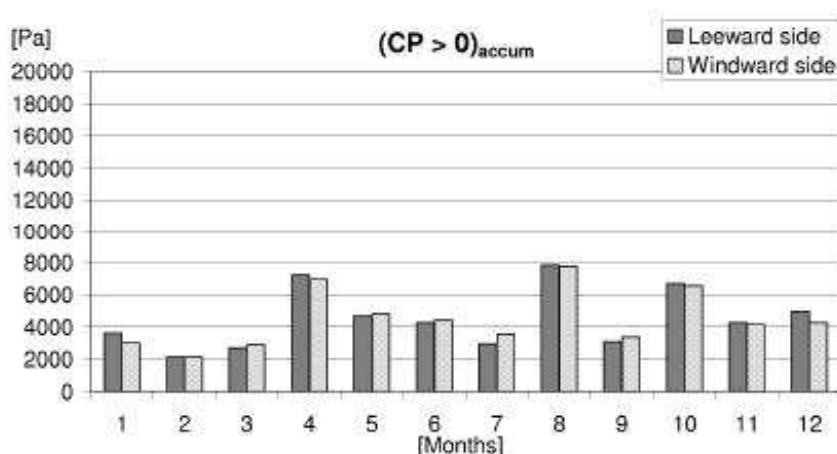


Fig. 6.11 – Variação do valor acumulado de CP com a direcção do vento (simulação numérica)

Estes dois parâmetros induzem modificações na transferência de calor por convecção perto da superfície e, por conseguinte, influenciam a temperatura superficial da parede. No entanto, a influência que estes parâmetros têm no valor de  $CP$  não é significativa. Logo, estes parâmetros poderão ser considerados como variáveis determinísticas no modelo probabilístico. No entanto, é necessário ter em consideração o efeito do vento na secagem da superfície;

### Obstáculos vizinhos

Este parâmetro influencia, principalmente, a quantidade de radiação que atinge a superfície. A consideração deste parâmetro como uma variável aleatória ou determinística dependerá do nível de detalhe a que o estudo estiver sujeito.

### 6.3. PARÂMETROS DOS COMPONENTES

Em relação aos *Parâmetros dos Componentes*, apresentam-se na seguinte lista os principais parâmetros envolvidos:

- Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água;
- Factor de resistência à difusão do vapor de água;
- Coeficiente de condutibilidade térmica;
- Coeficiente de transmissão térmica;
- Massa volúmica;
- Calor específico;
- Porosidade;
- Coeficiente de transporte líquido;
- Coeficiente de absorção de água;
- Curvas de armazenamento de humidade;
- Espessura.

### 6.3.1. GAMA DE VALORES POSSÍVEIS - NORMALIZAÇÃO

Em relação a estes parâmetros, começa-se com a análise de duas propriedades, a partir dos seus coeficientes respectivos: o **coeficiente de permeabilidade ao vapor de água** e o **coeficiente de condutibilidade térmica**.

Apesar de ser uma característica bem definida para cada material, a experiência tem demonstrado que, em alguns materiais, o valor da permeabilidade ao vapor é bastante dependente do teu teor de humidade que, no domínio higroscópico, varia de acordo com as condições ambientais a que o material é submetido, em particular com a humidade relativa [16].

A permeabilidade ao ar e as propriedades dos materiais relativas à transferência de humidade na fase líquida, são também factores com alguma influência sobre a sua permeabilidade ao vapor de água, para além das heterogeneidades inerentes aos materiais anisotrópicos [16].

A temperatura tem alguma influência sobre a permeabilidade ao vapor de água dos materiais e elementos construtivos, contudo esta é menos importante que a da humidade relativa e na maior parte dos casos o seu efeito não é tomado em consideração [16].

Em suma, a forte influência das condições ambientais, nomeadamente a humidade relativa, sobre as características de permeabilidade ao vapor de água dos diversos materiais de construção, leva a que haja uma extensa variabilidade de valores para a sua definição. Esta incerteza é tão relevante, que na Nota de Informação Técnica, NIT nº002 (LFC 1998) [16], são apresentados intervalos de valores onde o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água se pode situar.

Mostram-se, no quadro que se segue, valores dos coeficientes de permeabilidade ao vapor ( $\pi$ ) para alguns materiais de construção.

**Quadro 6.2 – Valores do coeficiente de permeabilidade ao vapor ( $\pi$ ) [16]**

Material	$\pi$ [kg / (m.s.Pa) x 10 <sup>-12</sup> ]
Aglomerado expandido de cortiça	3 a 41
Betão celular	15 a 61
Betão normal	0,71 a 13
Contraplacado	0,46 a 7,1
Lã de rocha	140 a 170
Lã mineral	97 a 185
Painéis/Placas de gesso cartonado	17 a 34
Poliestireno expandido	1,2 a 10
Poliestireno extrudido	0,6 a 2,3
Reboco à base de gesso	17 a 38

Sugere-se como referência, a norma EN ISO 12572 [35], por ter como âmbito os materiais e elementos de construção. Nesta norma é também definida a obtenção de propriedades derivadas como o factor de resistência à difusão do vapor de água ( $\mu$ ). Recorrendo a normas estrangeiras, nomeadamente a DIN 4108-4, também podem ser encontrados valores para este factor.

Visto isto, conclui-se que estes parâmetros têm uma grande variabilidade, pelo que deve ser considerada a sua aleatoriedade nos modelos de análise de risco. Para a realização de uma análise de fiabilidade de um dos acontecimentos indesejáveis, é necessário efectuar-se uma análise de sensibilidade para perceber qual a variabilidade destes parâmetros no comportamento higrotérmico de um elemento.

O **coeficiente de condutibilidade térmica** de um material representa a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente um provete desse material com faces planas e paralelas, por unidade de tempo e espessura, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre as duas faces ( $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) [16].

A condutibilidade térmica varia com a densidade, com o teor em humidade e com a temperatura do material.

As normas ISO 8302 e NP 2254 [36-37] permitem determinar a condutibilidade térmica dos materiais utilizando o método *Guarded-Hot-Plate*.

A título de exemplo, o teor de humidade que os materiais de isolamento térmico apresentam condiciona de uma forma significativa a sua condutibilidade térmica ( $\lambda$ ).

Na figura seguinte apresentam-se valores de  $\lambda$  em função do teor de humidade para os vários materiais de isolamento.

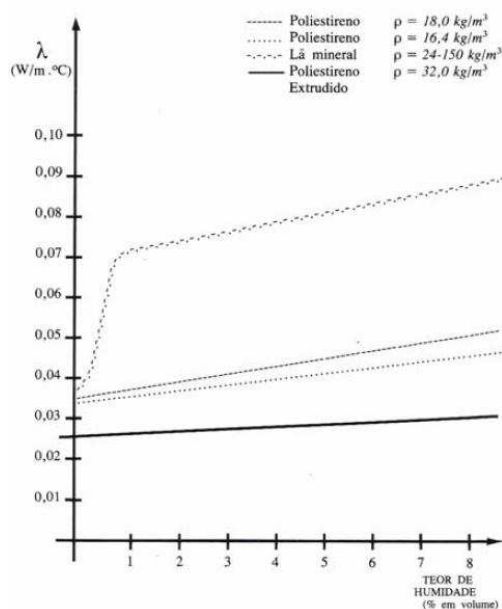


Fig. 6.12 - Variação da condutibilidade térmica com o teor de humidade para vários materiais de isolamento térmico

Conclui-se que este parâmetro, tal como para o coeficiente de permeabilidade ao vapor, terá de ser considerado como uma variável aleatória nos modelos de análise de risco estudados.

O **coeficiente de transmissão térmica**,  $U$ , de um elemento com uma dada espessura e de faces planas e paralelas, representa a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente, por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre as suas faces [16]. Este coeficiente pode ser definido como sendo o valor que determina a permeabilidade de um elemento à passagem do calor e, assim, caracteriza a propriedade do isolamento térmico de um elemento da envolvente. A unidade de medida é: (W/m<sup>2</sup>.°C).

O cálculo de  $U$  resulta da soma do inverso das resistências térmicas das diversas camadas do elemento da envolvente, bem como das resistências superficiais interior e exterior.

A Resistência térmica total  $R_t$  é o inverso de  $U$ .

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{(R_i + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_e)} \quad (6.1)$$

O cálculo da resistência térmica,  $R$  (m<sup>2</sup>.°C/W), duma camada do elemento da envolvente resulta do quociente da espessura dessa camada e do coeficiente de condutibilidade térmica,  $\lambda$ , do material que compõe essa camada.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (6.2)$$

No Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [38] são indicados os valores dos coeficientes de transmissão térmica  $U$ , de referência e máximos admissíveis, em função das zonas climáticas e do tipo de envolvente.

A publicação LNEC ITE 50-2006 destina-se a apoiar a realização de estudos no âmbito do desempenho térmico dos edifícios e a aplicação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, apresentando coeficientes de transmissão térmica de soluções correntes da envolvente de edifícios, para além de indicar valores convencionais de cálculo de condutibilidades térmicas de materiais. Em termos práticos, os valores dos coeficientes de transmissão térmica apresentados nesta publicação são aplicáveis, com razoável margem de segurança, às soluções correntes.

Ou seja, os valores a atribuir a este coeficiente podem ser consultados em diferentes tabelas destinadas para tal efeito. No entanto, é inevitável a sua variabilidade para diferentes materiais. Por conseguinte, este parâmetro deverá ser considerado como uma variável aleatória no modelo de análise de risco.

As normas, por ex. EN ISO 10545-3 (pavimentos e revestimentos cerâmicos), EN 12390-7 (betão endurecido), EN 772-12 (blocos para alvenaria, excepto pedra natural) podem ser aplicadas na determinação da **massa volúmica**. [39-41].

O clássico método das misturas, um dos mais simples para a determinação de capacidades térmicas mássicas, baseia-se no “princípio da igualdade das trocas de vapor” (ver norma ASTM C 351-92b [42]). Consegue-se através desde princípio determinar o **calor específico**.

As normas EN ISO 10545-3 (pavimentos e revestimentos cerâmicos) e ASTM C 20 (tijolos refractários) podem ser aplicadas na determinação da **porosidade** aparente [39,43].

Os coeficientes de transporte líquido podem ser estimados a partir do valor do **coeficiente de absorção de água** ( $A$ ) através de um método integrado no programa WUFI. A norma de referência para a determinação por imersão parcial é a EN ISO 15148 [44].

Em relação à determinação das **curvas de armazenamento de humidade** (curvas higroscópicas de materiais) pode ser realizada com recurso a diferentes métodos. Para materiais de construção, os métodos mais utilizados são os métodos gravimétricos, seguindo por exemplo, a norma EN ISO 12571 [45].

Para inúmeros materiais de construção estes parâmetros adicionais que descrevem a higroscopia e as propriedades capilares estão disponíveis em bases de dados relevantes (tal como a base de dados do WUFI).

Para finalizar o conjunto de parâmetros dos componentes, falta falar sobre a **espessura** do elemento construtivo. Esta, sendo um parâmetro geométrico, considera-se como um parâmetro determinístico na análise de risco.

Em síntese, os parâmetros dos componentes têm de ser avaliados cuidadosamente (com excepção da espessura, que será um valor fixo). Para perceber a sua variabilidade e a sua influência no comportamento higrotérmico de um dado elemento, será necessário fazer uma análise de sensibilidade para cada parâmetro. Apenas através de simulações, poderá ser possível concluir acerca da importância de cada parâmetro numa análise global do fenómeno em estudo.

Para abordagens menos complexas, recorrer a valores médios para as propriedades dos materiais poderá ser uma solução razoável. Sendo assim, estes parâmetros considerar-se-ão como determinísticos nos modelos de análise de risco.

#### 6.4. PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

Por último, faltam referir os *Parâmetros de Operação*, os quais são influenciados pelas condições de utilização da envolvente interior dos edifícios. Apresentam-se na lista que se segue os principais parâmetros de operação envolvidos nos fenómenos estudados anteriormente:

- **Temperatura do ar interior;**
- **Produção de vapor;**
- **Ventilação.**

O desenvolvimento que se segue referente a este aspecto foi elaborado por Ramos, N [26], onde é sintetizada a variabilidade dos parâmetros de operação que entram na análise de risco.

A utilização da envolvente interior dos edifícios tem muita importância no clima exterior destes. Esta utilização intervém em vários factores que condicionam a humidade relativa. Segundo Ramos, N [26], uma parte dessa importância pode ser sistematizada através de valores numéricos, que são fundamentais para a utilização de ferramentas de previsão do comportamento higrotérmico dos edifícios. Na prática, subsistem sempre muitas dúvidas sobre a **temperatura**, os **caudais de ventilação** e a **produção de vapor** que se verificam de facto num compartimento.

Alguns exemplos dos muitos factores que determinam o comportamento dos utilizadores e a sua influência no clima interior são:

- O tipo de compartimento;
- O clima exterior;
- A atitude dos ocupantes face ao consumo de energia.

#### 6.4.1. GAMA DE VALORES POSSÍVEIS

De acordo com Ramos, N [26], “apesar de todas as incógnitas associadas ao comportamento humano, é possível obter, em diferentes referências, valores da produção de vapor associados a diferentes actividades humanas”. No Quadro 6.3 apresentam-se alguns valores citados em Raatschen et al. (1991). Apresentam-se ainda, no Quadro 6.4, outros valores contidos na norma BS5925 (BSI, 1991). Este tipo de valores tem especial interesse para a análise de cenários de comportamento higrotérmico de edifícios, através de ferramentas de simulação.

**Quadro 6.3 – Alguns valores da produção de vapor em edifícios [26]**

Fonte de vapor		Valor (g/h)
Humanos	Actividade reduzida	30 – 60
	Actividade intermédia	120 – 200
	Actividade elevada	200 – 300
Higiene	Banho	~700
	Duche	~2600
Cozinha		600 – 1500
Plantas em vasos		5 – 20
Secagem de roupa (4,5 kg)	Após centrifugação	50 – 200
	Sem centrifugação	100 – 500

**Quadro 6.4 – Estimativa da produção de vapor em actividades domésticas [26]**

Actividade	Vapor de água (g/dia)
Cozinhar a electricidade	2000
Cozinhar a gás	3000
Lavagem de loiça	400
Banho (por pessoa)	200
Lavagem de roupa	500
Secagem de roupa no interior de um compartimento (por pessoa)	1500

“A avaliação da produção de vapor numa habitação, ao longo de um dia, permite encontrar grandes dispersões. Em Aoki-Kramer e Karagiozis (2004), citam-se diferentes fontes que fazem variar a produção de vapor numa habitação entre 4 e 14 kg/dia numa habitação ocupada por duas pessoas. Estes dados evidenciam a grande variabilidade que o comportamento humano introduz no parâmetro produção de vapor.” [26]

“A produção de calor associada às actividades humanas no interior de um edifício assume, também, uma grande variabilidade. No Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios, RCCTE: 2006, definem-se valores nominais, para ganhos térmicos médios por unidade de área útil, correspondentes a 4 W/m<sup>2</sup> em edifícios de tipo residencial e 7 W/m<sup>2</sup> em edifícios de serviços.” [26]

“A influência dos utilizadores sobre o clima interior manifesta-se, ainda, de outras formas, com carácter mais subjectivo e com ainda maior dificuldade de quantificação. Os caudais de ventilação podem ser substancialmente alterados pela abertura de janelas por parte dos utilizadores. Valores adicionais de renovações horárias entre 0,25 h<sup>-1</sup> e 0,35 h<sup>-1</sup> foram detectados por estudos realizados em países do Norte da Europa e citados em Raatschen et al. (1991).” [26]

A temperatura que se encontra, de facto, no interior de um edifício, é também extremamente variável e muito dependente da atitude do utilizador face ao consumo de energia pelos sistemas de aquecimento. Os regulamentos de comportamento térmico, incluindo o RCCTE (2006), apontam normalmente para 20 °C como temperatura de cálculo para o Inverno. De acordo com Raatschen et al. (1991), muitas pessoas preferem temperaturas em quarto de dormir abaixo de 17 °C, verificando-se nas salas ocupadas temperaturas entre 20 °C e 24 °C [26].

Como foi referido no desenvolvimento dos parâmetros de operação nos capítulos anteriores, existe um parâmetro muito útil que relaciona os principais factores que caracterizam as condições climáticas interiores: a higrometria.

Apresenta-se no Quadro 6.5 os valores para a higrometria propostos por Freitas e Pinto (1998) para Portugal. A norma EN ISO 13788 sugere classes de humidade interior de referência, dependentes da temperatura exterior, que devem ser confirmadas regionalmente.

O trabalho desenvolvido por França (2002) procurou avaliar a higrometria real em edifícios de habitação portugueses, apresentando-se no gráfico da Fig. 6.13 os resultados aí obtidos e comparados com as duas classificações citadas. A variação com a temperatura sugerida pela EN ISO 13788 não parece adequada aos edifícios estudados em Portugal, mas é necessário um estudo mais pormenorizado do clima interior dos edifícios portugueses para obter conclusões definitivas [26].

Algumas disparidades ao nível da relação entre a higrometria e a temperatura exterior, proposta pela EN ISO 13788, foram também detectadas em trabalhos de campo realizados na Finlândia (Kalamees et al., 2005).

A avaliação do clima interior através de classes de higrometria é útil para a definição de condições fronteira e para a avaliação do risco de ocorrência de condensações internas em elementos construtivos, através de métodos simplificados, como o método de Glaser (Freitas e Pinto, 1998).



Quadro 6.5 – Classificação dos edifícios em função da sua higrometria [26]

Classe	Higrometria	Tipo de Edifício
I – Fraca higrometria	$\frac{M_{\text{ganhos}}}{N \cdot V} \leq 2,5 \text{ g/m}^3$	Escritórios, escolas, ginásios
II – Média higrometria	$2,5 \leq \frac{M_{\text{ganhos}}}{N \cdot V} \leq 5,0 \text{ g/m}^3$	Edifícios de habitação não sobreocupados e correctamente ventilados
III – Forte higrometria	$5,0 \leq \frac{M_{\text{ganhos}}}{N \cdot V} \leq 7,5 \text{ g/m}^3$	Edifícios de habitação com ventilação deficiente, indústrias
IV – Muito forte higrometria	$\frac{M_{\text{ganhos}}}{N \cdot V} \geq 7,5 \text{ g/m}^3$	Piscinas, certas indústrias

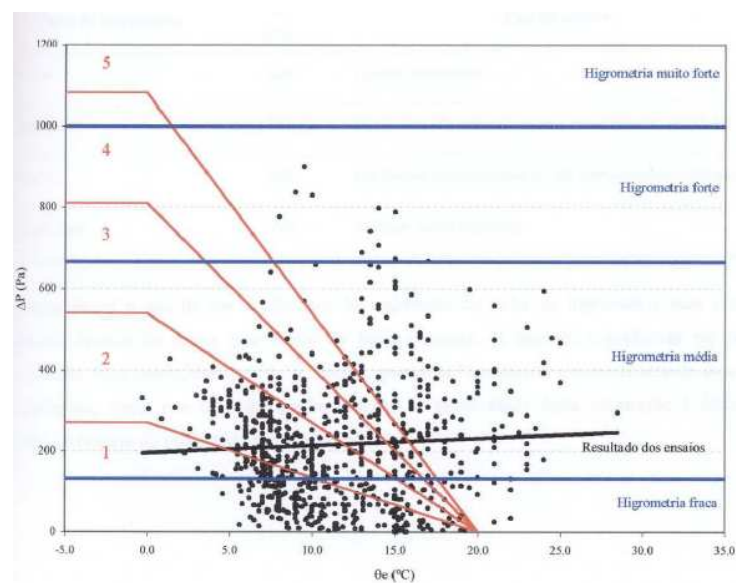


Fig. 6.13 – Gráfico retirado de França (2002) com medições de higrometria em edifícios portugueses (a preto) comparadas com as classes sugeridas pela EN ISO 13788 (a vermelho) e por Freitas e Pinto (1998) (a azul) [25]

A utilização de classes de higrometria na caracterização do clima interior dos edifícios cumpre determinados objectivos. A suposição de um regime permanente para a humidade interior, apesar de afastada da realidade, é muitas vezes suficiente para análises de risco como as previstas na EN ISO 13788. Uma avaliação mais detalhada do clima interior implica o conhecimento da evolução da humidade relativa num regime dinâmico. Nesse caso, não se pode desprezar a capacidade de armazenamento de humidade dos elementos interiores [26].

Em resumo, pode dizer-se que os parâmetros de operação apresentam grande variabilidade nos seus valores pelo que é impossível defini-los como determinísticos no modelo análise de risco. No entanto, e depois da explanação destes aspectos recorrendo a trabalhos desenvolvidos, percebe-se que, para um nível de complexidade pouco elevado (maioria dos casos práticos), é possível simplificar esta análise. Esta simplificação passa pela utilização de valores de higrometria estudados, tal como podemos ver no Quadro 6.5 e na Fig. 6.13.



## 7

## CONCLUSÕES

### 7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com as expectativas do autor, os objectivos inicialmente propostos para este trabalho podem considerar-se alcançados. No entanto, o desenvolvimento deste trabalho permitiu concluir que o comportamento higrotérmico de edifícios é um assunto bastante importante para a vida de um edifício e haverá, com certeza, muita investigação a realizar neste âmbito.

O trabalho realizado nesta dissertação é uma primeira abordagem a esta temática, pelo que o objectivo implícito na elaboração do mesmo, foi explorar as dificuldades e mostrar possíveis caminhos para a aplicação de modelos de análise de risco no comportamento higrotérmico de edifícios.

### 7.2. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

Os objectivos parciais, estabelecidos no início deste texto, foram sucessivamente alcançados, podendo extrair-se desse percurso algumas das principais conclusões desta dissertação.

A elaboração do estado da arte sobre a avaliação de risco em engenharia civil permitiu estabelecer o seguinte:

- A identificação de acontecimentos com possíveis consequências indesejadas e a definição dos cenários para a ocorrência desses acontecimentos constituem o passo crucial na análise de risco;
- O correcto entendimento da terminologia associada à análise de risco, nomeadamente: *acontecimento indesejável*, *risco*, *fiabilidade*, *estimativa do risco*, *comparação do risco* e *risco aceitável*, é muito importante no desenvolvimento de uma análise de risco;
- O paralelismo entre a aplicação da análise de risco na área estrutural e no comportamento higrotérmico pode ser estabelecido, embora este último seja mais complexo devido não só à grande variabilidade dos parâmetros envolvidos no comportamento higrotérmico, mas também face à dependência do tempo dos fenómenos.

O desenvolvimento de dois modelos estocásticos de análise de risco permitiu concluir o seguinte:

- Relativamente ao modelo solicitação-resistência, este apresenta limitações referentes à não linearização de alguns problemas relativos ao comportamento higrotérmico, o que torna mais complexa a realização de uma análise de fiabilidade;
- Em estudos dinâmicos a aplicação do modelo solicitação-resistência é mais difícil e, por conseguinte, diferentes abordagens com níveis de complexidade distintos são desenvolvidas para ter em conta esta dificuldade;
- A dificuldade patente no ponto anterior pode ser atenuada com a aplicação do modelo dose-resposta. Este modelo permite incluir a evolução dos parâmetros em função do tempo.

A aplicação dos modelos de análise de risco a acontecimentos indesejáveis permitiu concluir o seguinte:

- Relativamente à aplicação do modelo solicitação-resistência na análise de risco da ocorrência de condensações superficiais interiores, foi seguida uma abordagem simples onde o critério de desempenho se baseou no aparecimento, ou não, de condensações superficiais. No entanto, se fosse adoptado um nível de complexidade mais elevado, designadamente o crescimento e desenvolvimento de microrganismos, seria necessário estabelecer outro critério de desempenho o que implicaria uma maior complexidade na realização da análise de fiabilidade;
- O desenvolvimento de dois níveis de complexidade de simulação numérica para a avaliação do risco de condensações internas em elementos construtivos, permitiu concluir que recorrendo a abordagens com maiores níveis de complexidade (análises em regime variável) é possível conhecer a variação, ao longo do tempo, do teor de humidade no elemento construtivo em cada uma das suas camadas, bem como o perfil de humidade do elemento. No entanto, devido à complexidade do modelo em regime dinâmico e à falta de informação necessária para a análise, recorre-se frequentemente a estudos em regime permanente através do modelo de Glaser;
- A aplicação do modelo solicitação-resistência na análise de risco da ocorrência de condensações superficiais exteriores mostrou ser muito complexa. Foram evidentes as dificuldades existentes para a adopção de um critério que tenha em consideração o crescimento e desenvolvimento de microrganismos. A inexistência de um limite de serviço através do qual a análise de fiabilidade se centraria, foi o aspecto mais relevante na análise deste acontecimento indesejável;
- A aplicação do modelo dose-resposta apoiado no modelo de previsão de crescimento de fungos (modelo VTT), permitiu estabelecer uma possível abordagem à análise de risco do crescimento e desenvolvimento de fungos. Estabelecendo a humidade relativa como dose de solicitação e recorrendo ao *mold index* para obter a resposta, foi possível idealizar uma possível abordagem relativa à análise de risco do crescimento e desenvolvimento de fungos em superfícies interiores;
- A aplicação do modelo dose-resposta embora tenha vantagem ao ter em conta o factor tempo de exposição, apresenta como desvantagem a necessidade de conhecer as curvas de distribui-

ção de cada parâmetro de solicitação. O conhecimento actual nesta área não está muito desenvolvido.

O estudo do comportamento estocástico dos parâmetros envolvidos nos modelos de análise de risco permitiu concluir o seguinte:

- Os parâmetros ambientais são importantes no comportamento higrotérmico de edifícios sendo decisivos na análise de risco para problemas com níveis de complexidade elevados (problemas reais). No entanto, estes parâmetros apresentam uma grande variabilidade e, devido à falta de informação relativa à variabilidade destes parâmetros, torna-se complicado caracterizar a aleatoriedade dos mesmos;
- A grande variedade de parâmetros dos componentes torna o estudo do comportamento estocástico destes parâmetros complexo. A variabilidade apresentada para estes parâmetros justifica-se por vários factores, como por exemplo os métodos de determinação que não apresentam a fiabilidade adequada. Adicionado a isto, a falta de informação da variabilidade de certas propriedades de materiais, realça a importância de realizar futuros trabalhos nesta área;
- A temperatura do ar interior e a higrometria são os principais parâmetros de operação que intervêm nos modelos de análise de risco estudados. A variabilidade destes parâmetros está relacionada com a forma como as pessoas utilizam as suas casas;
- Embora a definição de valores para a higrometria apresente uma variabilidade extensa, estudos realizados nos últimos anos permitem conhecer classes de valores importantes para a avaliação do risco.

### 7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesta dissertação permitem estabelecer diferentes vias para a continuidade do trabalho desenvolvido:

- Conhecimento detalhado dos parâmetros de *input* (ambientais, dos componentes e de operação) usando distribuições probabilísticas baseadas em dados estatísticos;
- Estudo das condições micro-climáticas à volta dos edifícios com o intuito de perceber melhor a sua influência no comportamento higrotérmico dos edifícios;
- Estudo das propriedades dos materiais com a definição das suas curvas de distribuição;
- Realização de análises de sensibilidade aos parâmetros envolvidos nos modelos de análise de risco desenvolvidos nesta dissertação, e assim, perceber melhor a variabilidade dos mesmos.



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] António Canha da Piedade. “Humidade em edifícios – uma perspectiva exigencial”, 6as Jornadas de Construções Civas – Humidade na Construção, 1998.
- [2] Nuno M.M. Ramos, Eva Barreira, João M.P.Q. Delgado, Vasco Peixoto de Freitas. Propriedades higrotérmicas utilizadas em simulação numérica. 3º PATORREB, Porto, 2009: pp. 429-434.
- [3] Achintya Haldar, Sankaran Mahadevan. Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, 2000.
- [4] Harr, M. E., Reliability-Based Design in Civil Engineering, McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [5] Ton Vrouwenvelder, Roger Lovegrove, Milan Holicky, Peter Tanner, Gerard Canisius. Risk Assessment and Risk Communication in Civil Engineering – Safety, Risk, Reliability – Trends in Engineering, Malta 2001.
- [6] José Manuel Matos Ribeiro da Fonseca, Indução de Árvores de decisão, Tese de Mestrado, Lisboa, 1994.
- [7] Uso da árvore de acontecimentos para a quantificação do risco de incêndios, Aula 12. Instituto Superior Técnico, 2007
- [8] Milan Holicky. Background Documents on Risk Assessment in Engineering – Document #7 – Terminology, JCSS (Joint Committee of Structural Safety), Czech Technical University, Prague, November 2008.
- [9] Carmeliet, Jan. Moisture safety in the building process, ASHRAE, in press.
- [10] Prof. Doutor Vasco Freitas. Qualidade da Envolvente dos Edifícios e Solicitação Higrotérmica – A Construção do Futuro: Desafios e Oportunidades – Anfiteatro do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro, 14/12/2005.
- [11] Krystyna Pietrzyk. Applications of probabilistic risk/reliability analysis based on limit state approach in various areas of building physics - rapport for IEA New annex - Start up meeting 23-24/3-2009.
- [12] Krystyna Pietrzyk, Carl-Eric Hagentoft. Probabilistic analysis of air infiltration in low-rise buildings. – Building and Environment 43, 537 – 549, 2008.

- [13] <http://www.emcom.ca/science/dose.shtml>, 18/05/2009.
- [14] Experiences and expectations within the field of annex Risk Assessment of Building Physics Performance with a special focus on retrofitting of existing buildings (RAP-RETRO) – Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences Slovakia. Report delivered to the start-up meeting in Göteborg, Sweden 23-24<sup>th</sup> of March 2009.
- [15] Henriques, Fernando M.A., Rato, Vasco M.. Avaliação do risco de ocorrência de condensações internas em coberturas planas - Cadernos Edifícios n.º 3, LNEC, Lisboa, 2003.
- [16] Freitas, V. P., Pinto, P. LFC - NIT 002: Permeabilidade ao vapor de materiais de construção - Condensações internas, FEUP, Porto, Portugal, 1998.
- [17] Mendes, Nathan. “Modelos para a previsão da transferência de calor e humidade em elementos porosos das edificações”, Tese para obtenção de Grau de Doutor, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- [18] FREITAS, V. P., PINTO, P.: Humidade na construção – Humidade de condensação, 2008.
- [19] CEN, *EN ISO 13788: Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods*, 2002.
- [20] CEN, *prEN 15026: Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements - Assessment of Moisture Transfer by Numerical Simulation. Draft*, 2004.
- [21] <http://www.wufi.de/>
- [22] Nuno M.M. Ramos, Eva Barreira, João M.P.Q. Delgado, Vasco Peixoto de Freitas. Análise de Condensações Internas em Paredes – Aplicação de Modelos de Diferente Complexidade. 3º PATOR-REB, Porto, 2009: pp. 435-440.
- [23] E.Barreira, V.P.Freitas & N.Ramos: “Risk of ETICS defacement – A sensitivity analysis of the demand parameters”, University of Porto, Faculty of Engineering, Porto, Portugal.



- [24] Hannu Viitanen, Juha Vinha, Ruut Peuhkuri, Tuomo Ojanen, Kimmo L hdesm ki, Kati Salmi-  
nen. Development of an improved model for mould growth: Modeling; Building Physics 2008 – 8<sup>th</sup>  
Nordic Symposium.
- [25] Mold in residential buildings – 2001 NAHB Research Center, 24 de Julho de 2001.
- [26] Ramos, N. “A importância da inércia higrosc pica no comportamento higrotérmico dos edifi-  
cios”, Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de  
Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [27] Klaus Sedlbauer. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building  
components - Fraunhofer Institute for Building Physics.
- [28] M. Krus, K. Sedlbauer, W. Zillig, H. M. K nzel. A New Model for Mould Prediction and its Ap-  
plication on a Test Roof. – Fraunhofer Institute for Building Physics: Contribution to the II Interna-  
tional Scientific Conference on “The Current Problems of Building Physics in the Rural Building”,  
Cracow, Poland, Nov. 2001.
- [29] Adan, O. “On the fungal defacement of interior finishes”. Dissertação, University of Technology,  
Eindhoven (1994).
- [30] Cláudia Naves David Amorim, “Desempenho térmico de edificações e simulação computacional  
no contexto da arquitectura bioclimática” - Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Arquitectu-  
ra e Urbanismo, programa de p s-graduação do mestrado em arquitectura e urbanismo, 1998.
- [31] Joseph Lstiburek, Moisture Control for New Residential Buildings – Building Science Digest  
012, 2009-03-09.
- [32] Vanda Pires, “Variabilidade e Alterações Climáticas – Tend ncias Observadas”, Instituto de  
Meteorologia, Departamento de Meteorologia e Clima, 2008.
- [33] Dr. ing. Berit Time, Research manager; Dr. ing. Jan Vincent Thue, Professor. RAP-RETRO –  
Risk assessment of building physics performance with a special focus on retrofitting of existing build-  
ings – “The Norwegian Contribution”.
- [34] PhD candidate: Vahid M. Nik; PhD Project: Sustainability of the Swedish built environment to-  
wards climate change. Hygro-thermal effects and design criteria for buildings with respect to future  
climate scenario.

- [35] EN ISO 12572: *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties*, 2001.
- [36] CEN, EN 8302: *Thermal Insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus*, 1991
- [37] C580/CT 58, NP2254: *Materiais plásticos. Materiais celulares. Determinação da condutividade térmica com o aparelho de placas*, 1998.
- [38] Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril. Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE).
- [39] CEN, EN ISO 10545-3: *Ceramic tiles: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density*, 1995.
- [40] NP, EN 12390-7: *Ensaio de betão endurecido. Massa volúmica do betão endurecido*, 2003.
- [41] NP, EN 772-12: *Determinação da massa volúmica de blocos para alvenaria*, 2002.
- [42] ASTM, C 351-92b: *Test method for mean specific heat of thermal insulation*, 1999.
- [43] ASTM, C20-00: *Test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired white ware products*, 2000.
- [44] CEN, EN ISO 15148: *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion*, 2002.
- [45] CEN, EN ISO 12571: *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of hygroscopic sorption properties*, 2000.